Deutscher Bundestag **Drucksache 19/1100**

19. Wahlperiode 28.02.2018

Vorabfassung - wird durch die endgültige Fassung ersetzt.

Unterrichtung

durch die Bundesregierung

Sondergutachten des Sachverständigenrates für Umweltfragen

Umsteuern erforderlich: Klimaschutz im Verkehrssektor

Inhaltsgliederung

Seite

Abkürzungsverzeichnis 10

Tabellenverzeichnis 12

Kurzfassung 13

1 Einleitung 23

2 Anforderungen des Klima- und Umweltschutzes 25

3 Der Verkehrssektor in einem dekarbonisierten Energiesystem 39

4 Klimaschutz und Transformation des Verkehrssektors 61

5 Empfehlungen 121

6 Ausblick 175

Literaturverzeichnis 176

Abkürzungsverzeichnis 209

Rechtsquellenverzeichnis 213

Einrichtungserlass 215

Zugeleitet mit Schreiben des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit vom 27. Februar 2018.

Vorabfassung - wird durch die endgültige Fassung ersetzt.

Sachverständigenrat für Umweltfragen

Prof. Dr. Claudia Hornberg (Vorsitzende)

Professorin für Umwelt und Gesundheit an der Fakultät für Gesundheitswissenschaften der Universität Bielefeld

Prof. Dr. Manfred Niekisch (stellvertretender Vorsitzender)

Professor für Internationalen Naturschutz an der Goethe-Universität Frankfurt und Direktor des Frankfurter Zoos

Prof. Dr. Christian Calliess

Professor für öffentliches Recht, insbesondere Umweltrecht, und Europarecht an der Freien Universität Berlin

Prof. Dr. Claudia Kemfert

Professorin für Energieökonomie und Nachhaltigkeit an der Hertie School of Governance und Leiterin der Abteilung Energie, Verkehr, Umwelt am Deutschen Institut für Wirtschaftsforschung, Berlin

Prof. Dr. Wolfgang Lucht

Professor an der Humboldt-Universität zu Berlin und Ko-Leiter der Abteilung Erdsystemanalyse am Potsdam-Institut für Klimafolgenforschung

Prof. Dr.-Ing. Lamia Messari-Becker

Professorin für Gebäudetechnologie und Bauphysik an der Fakultät II Bildung · Architektur · Künste der Universität Siegen

Prof. Dr.-Ing. Vera Susanne Rotter

Professorin im Fachgebiet Kreislaufwirtschaft und Recyclingtechnologie an der Technischen Universität Berlin

Die Ratsmitglieder bedanken sich für die sehr kompetente und engagierte Unterstützung durch die Mitarbeitenden des SRU. Besondere inhaltliche Verantwortung bei der Erstellung des Sondergutachtens übernahmen Dr. Carl-Friedrich Elmer, Miriam Dross LL.M., Dr. Mechthild Baron, Kristine Sperlich, Alexander Franke und Annette Volkens.

Zum wissenschaftlichen Stab des Umweltrates gehörten während der Erstellung dieses Gutachtens außerdem: Dr. Julia Hertin (stellvertretende Generalsekretärin, kommissarische Leitung der Geschäftsstelle), Barbara Bernard, Andrea Bues, Dr. Henriette Dahms, Dr. Olaf Dilling, Patricia Horst, Dr. Casimir Lorenz, Dr. Pao-Yu Oei, Dr. Timothy McCall, Dr. Markus Salomon, Dr. Elisabeth Schmid, Lara Steup, Dr. Martin Winter.

Zu den Mitarbeitenden der Geschäftsstelle gehörten: Petra Busch, Ute Fritsch, Susanne Junker, Rainer Kintzel, Pascale Lischka, Susanne Winkler und Sabine Wuttke.

Charlotte Bopp, Merlin Michaelis, Johannes Moser und Halina Zeisler haben die Arbeit im Rahmen eines Praktikums unterstützt.

Vorabfassung - wird durch die endgültige Fassung ersetzt.

Danksagung

Der SRU dankt den Vertretern der Ministerien und Ämter des Bundes und der Länder sowie den Vertretern von Wissenschaft und von Interessenverbänden, die er konsultiert hat und ohne deren Kenntnisse, Forschung oder Erfahrungen das vorliegende Sondergutachten nicht möglich gewesen wäre:

Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit (BMUB):
Dr. Kerstin Anders, Markus Becker, Dr. Axel Borchmann, Uwe Brendle, Matthias Casper, Dr. Malte Helbig, Dr. Sabine Lattemann, Anne Miehe, Mareike Welke, Dr. Stefanie Wolter

Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur (BMVI):
Hendrik Haßheider, Helge Pols

Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi):
Beatrix Brodkorb, Kathrin Karkoska

Umweltbundesamt (UBA):
Martyn Douglas, Matthias Futterlieb, Manuel Hendzlik, Matthias Jung, Lea Köder, Regina Kohlmeyer, Jan Kosmol, Bernd Krause, Martin Lambrecht, Marco Schäfer, Alexander Schülke

Agora Verkehrswende:
Christian Hochfeld, Anne Klein-Hitpaß, Urs Maier, Kerstin Meyer, Fritz Vorholz

Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR):
Prof. Dr. Barbara Lenz

Institut für Energie- und Umweltforschung Heidelberg GmbH (IFEU):
Frank Dünnebeil

International Council on Clean Transportation:
Peter Mock, Felipe Rodríguez, Sandra Wappelhorst

Kanzlei Becker Büttner Held (bbb):
Dr. Roman Ringwald

Kompetenz Center Wettbewerb (KCW):
Dr. Astrid Karl, Dr. Jan Werner

M-Five:
Dr. Wolfgang Schade

Öko-Institut:
Ruth Blanck, Dr. Matthias Buchert, Dr. Martin Cames, Dr. Wiebke Zimmer

Universität Augsburg:
Prof. Dr. Armin Reller

Universität Bremen:
Dr. Till Markus

Vorabfassung - wird durch die endgültige Fassung ersetzt.

Universität Kassel:
Prof. Dr. Carsten Sommer

Verband der Automobilindustrie (VDA):
Dr. Martin Koers

Verkehrsclub Deutschland e.V. (VCD):
Michael Müller-Görnert

Auf seinen Ratssitzungen hat der SRU zwei Anhörungen durchgeführt, bei denen er Vertreter der Wissenschaft, Unternehmens- und Umweltverbände sowie Bundesministerien befragt hat. Als Teil seiner Qualitätssicherungsstrategie führt der SRU regelmäßig ein pluralistisches Reviewverfahren zu den Gutachtenentwürfen durch. Dabei wird jedes Kapitel von einer Reihe von externen Fachleuten mit verschiedenen fachlichen Perspektiven kommentiert. Den zuständigen Ministerien wurden die Gutachtentexte vorab zur Verfügung gestellt. Der SRU dankt BMUB, BMF, BMWi, UBA für hilfreiche und detaillierte Anmerkungen.

Unterstützung für das Umweltgutachten erhielt der SRU auch durch ein externes Sachverständigengutachten von Clemens Gerbaulet mit dem Titel „Darstellung und Bewertung von Pfaden zur Dekarbonisierung des Energieversorgungssystems unter besonderer Berücksichtigung der Sektorkopplung“.

Die volle Verantwortung für das vorliegende Gutachten übernehmen die Mitglieder des Sachverständigenrates für Umweltfragen.

Vorabfassung - wird durch die endgültige Fassung ersetzt.

Vorabfassung - wird durch die endgültige Fassung ersetzt.

Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis 10

Tabellenverzeichnis 12

Kurzfassung 13

1 Einleitung 23

2 Anforderungen des Klima- und Umweltschutzes 25

2.1 Risiken des Klimawandels 25

2.2 Klimaschutzziele 27

2.3 Weitere Umweltziele 29

2.3.1 Ziele des Umwelt- und Naturschutzes 29
2.3.2 Besondere Bedeutung von Rohstoffen 30
2.3.3 Rohstoff- und Ressourcenschonungsziele 33
2.3.4 Kreislaufwirtschaftsziele 34

2.4 Synergien und Zielkonflikte der Klimaschutzziele mit anderen Umweltzielen 35

2.5 Zwischenfazit 36

3 Der Verkehrssektor in einem dekarbonisierten Energiesystem 39

3.1 Wärmeversorgung von Gebäuden 40

3.2 Energieversorgung der Industrie 41

3.3 Intersektorale Wechselwirkungen 43

3.4 Gesamtwirtschaftliche Dekarbonisierungsszenarien 45

3.5 Rohstoffbedarf für die Stromversorgung und Kreislaufführung der Rohstoffe 49

3.5.1 Stromerzeugungstechnologien 49
3.5.2 Netzausbau 55
3.5.3 Speichermedien 55
3.5.4 Rohstoffverfügbarkeiten und Rohstoffkonkurrenzen 56

3.6 Implikationen für die Dekarbonisierung des Verkehrs 58

4 Klimaschutz und Transformation des Verkehrssektors 61

4.1 Ausgangslage Verkehr 61

4.1.1 Umwelt- und Gesundheitsauswirkungen des Verkehrs 62
4.1.2 Verkehrsleistung 65
4.1.3 Energieverbrauch 65

Vorabfassung - wird durch die endgültige Fassung ersetzt.

4.1.4 Treibhausgasemissionen ... 65
4.1.5 Straßenpersonenverkehr ... 66
4.1.6 Straßengüterverkehr ... 67
4.1.7 Schienenpersonenverkehr ... 68
4.1.8 Schienengüterverkehr ... 69
4.1.9 Binnenschiffsverkehr ... 69
4.1.10 Seeschiffsverkehr ... 69
4.1.11 Luftverkehr ... 72
4.1.12 Politischer Rahmen: Ziele für den Verkehrssektor ... 73

4.2 Möglichkeiten zur Minderung des Treibhausgasausstoßes des Verkehrssektors ... 77
4.2.1 Wissenschaftliche Studien und Verkehrsprognose 2030 ... 78
4.2.2 Neue Antriebe und Umstieg auf treibhausgasneutrale Energieträger ... 80
4.2.3 Energieeffizienz ... 93
4.2.4 Verlagerung und Vermeidung von Verkehr ... 97
4.2.5 Mögliche Ko-Benefits von Veränderungen im Verkehrssektor ... 100
4.2.6 Zwischenfazit ... 102

4.3 Pfade zu einem klimaneutralen Verkehr ... 102
4.3.1 Straßenpersonenverkehr ... 103
4.3.2 Straßengüterverkehr ... 104
4.3.3 Schienenverkehr ... 105
4.3.4 Schiffsverkehr ... 106
4.3.5 Luftverkehr ... 106
4.3.6 Verantwortungsbewusster Umgang mit Rohstoffen ... 106

4.4 Transformation des Verkehrssystems: Industrie und Gesellschaft ... 108
4.4.1 Stabilität des sozio-technischen Systems und der Automobilbranche ... 108
4.4.2 Deutschland in der globalen Mobilitätswende ... 109

4.5 Auswirkungen der Digitalisierung ... 113
4.5.1 Entwicklung des autonomen Fahrens ... 113
4.5.2 Auswirkungen auf das Ziel der Dekarbonisierung des Verkehrs ... 115
4.5.3 Notwendigkeit integrierter Mobilitätskonzepte ... 117
4.5.4 Zwischenfazit ... 119

5 Empfehlungen ... 121

5.1 Reform von Steuern, Abgaben und Subventionen ... 122
5.1.1 Reform von Steuern und Abgaben auf Energieverbrauch und Treibhausgasemissionen ... 122
5.1.2 Abschaffung umweltschädlicher Subventionen im Verkehr ... 127

5.2 Gezielte Förderung alternativer Antriebe ... 129
5.2.1 Technologieneutralität versus gezielte Transformationsunterstützung ... 130
5.2.2 Quotenregelung für alternative Antriebe ... 132

5.3 Instrumente zur Verbesserung der Fahrzeugeffizienz: Grenzwerte und fiskalische Anreize ... 134
5.3.1 Weiterentwicklung der europäischen CO_2-Grenzwerte ... 134
5.3.2 CO_2- oder energieverbrauchsabhängige Kfz-Steuern und Bonus-Malus-Systeme ... 139

Vorabfassung - wird durch die endgültige Fassung ersetzt.

5.4 Neue Infrastruktur für einen elektrifizierten Verkehr 140
5.4.1 Ladeinfrastruktur für Elektrofahrzeuge 140
5.4.2 Oberleitungsinfrastruktur für schwere Nutzfahrzeuge 142
5.4.3 Wasserstoffinfrastruktur 144
5.5 Rohstoffbezug und Kreislaufführung 144
5.5.1 Etablierung internationaler Umwelt- und Sozialstandards bei der Rohstoffgewinnung 146
5.5.2 Rohstoffinventar 147
5.5.3 Kreislaufpass und anspruchsvolle Recyclinganforderungen 148
5.6 Streckenabhängige Pkw- und Lkw-Maut 150
5.7 Geschwindigkeitsbeschränkungen auf Autobahnen 153
5.8 Fortentwicklung der Bundesverkehrswegeplanung 154
5.9 Reform des Personenbeförderungsgesetzes 158
5.9.1 Ländlicher Raum und öffentlicher Personennahverkehr 158
5.9.2 Regelungen des Personenbeförderungsgesetzes und Reformbedarf 159
5.10 Digitalisierung und autonomes Fahren 163
5.11 Instrumente zur Stärkung des Schienenverkehrs 164
5.12 Instrumente für einen klimaneutralen Seeschiffsverkehr 166
5.12.1 Nationalstaatliche Zuordnung der Treibhausgasemissionen des Seeschiffsverkehrs 167
5.12.2 Monitoring der Treibhausgasemissionen in der EU 168
5.12.3 Verpflichtende globale Standards 168
5.12.4 Freiwillige internationale Initiativen 169
5.12.5 Empfehlungen für die Seeschifffahrt 170
5.13 Instrumente für einen klimaneutralen Luftverkehr 171
5.14 Beschleunigter Ausbau der erneuerbaren Energien 173

6 Ausblick 175

Literaturverzeichnis 176

Abkürzungsverzeichnis 209

Rechtsquellenverzeichnis 213

Einrichtungserlass 215

Vorabfassung - wird durch die endgültige Fassung ersetzt.

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1 Treibhausgasemissionen ausgewählter Sektoren in Deutschland (1990–2016) ... 14

Abbildung 2 Reichweite von Pkw mit unterschiedlichen Technologien (bei 15 kWh Primärenergieeinsatz) ... 16

Abbildung 2-1 Treibhausgasemissionen ausgewählter Sektoren in Deutschland (1990–2016) ... 28

Abbildung 2-2 Rohstoffabbau weltweit 1970–2015 ... 30

Abbildung 2-3 Potenzielle Umwelt- und Gesundheitsauswirkungen des Einsatzes von Klimaschutztechnologien ... 36

Abbildung 3-1 Schematische Darstellung einer dekarbonisierten Strom- und Wärmeversorgung ... 40

Abbildung 3-2 Mit erneuerbaren Wärmequellen erzielbare Temperaturbereiche ... 42

Abbildung 3-3 Optionen der Sektorkopplung in einem dekarbonisierten Energiesystem ... 44

Abbildung 3-4 Bandbreite der prognostizierten erneuerbaren Stromerzeugungskapazitäten in verschiedenen Studien ... 48

Abbildung 3-5 Rohstoffe für Windkraftanlagen ... 52

Abbildung 3-6 Rohstoffe und Materialien für Photovoltaikmodule ... 54

Abbildung 3-7 Bedarf unterschiedlicher Rohstoffe für ausgewählte Zukunftstechnologien (Schätzungen für 2013 und 2035) im Vergleich zur Primärproduktion der jeweiligen Rohstoffe im Jahr 2013 ... 57

Abbildung 4-1 Sektorale Treibhausgasemissionen Deutschlands im Jahr 2015 ... 62

Abbildung 4-2 Personenverkehr nach Verkehrsmodus ... 63

Abbildung 4-3 Zulassungen und Bestand von Pkw von 1960 bis heute ... 63

Abbildung 4-4 Endenergieverbrauch des Verkehrs ... 66

Abbildung 4-5 Vergleich der spezifischen Emissionen einzelner Verkehrsträger im Personenverkehr je Personenkilometer (2010) ... 67

Abbildung 4-6 Vergleich der spezifischen Treibhausgasemissionen einzelner Verkehrsträger im Güterverkehr je Tonnenkilometer (2010) ... 67

Abbildung 4-7 Entwicklung des Güterverkehrs und des Bruttoinlandsprodukts ... 68

Vorabfassung - wird durch die endgültige Fassung ersetzt.

Abbildung 4-8 Anteile der Verkehrsmittel an der Güterbeförderung 2016 ... 68

Abbildung 4-9 Entwicklung der Gütermenge im deutschen Seegüterverkehr ... 70

Abbildung 4-10 Entwicklung der Treibhausgasemissionen aus dem internationalen Seeverkehr absolut und in Anteilen der globalen Gesamtemissionen ... 71

Abbildung 4-11 Verkehrsleistung im Luftverkehr ... 72

Abbildung 4-12 Treibhausgasemissionen des Luftverkehrs im deutschen Inventar (1990–2014) . 73

Abbildung 4-13 Dekarbonisierungskaskade ... 77

Abbildung 4-14 Alternative Pkw-Antriebstechnologien ... 82

Abbildung 4-15 Energetischer Gesamtwirkungsgrad (h) verschiedener Antriebsoptionen ... 86

Abbildung 4-16 Reichweite von Pkw mit unterschiedlichen Technologien (bei 15 kWh Primärenergieeinsatz) ... 87

Abbildung 4-17 Bedarf an Lithium, Dysprosium, Terbium, Neodym, Praseodym, Kobalt, Platin und Kupfer für den Verkehrssektor im Vergleich zu anderen ausgewählten Zukunftstechnologien im Jahr 2035 ... 90

Abbildung 4-18 Personenverkehrsnachfrage 2050 ... 97

Abbildung 4-19 Güterverkehrsnachfrage 2050 ... 98

Abbildung 4-20 Die verbrennungsmotorgetriebene Mobilität als sozio-technisches System ... 108

Abbildung 4-21 Rückgang der Batteriepreise und Wachstum bei batterieelektrischen Fahrzeugen ... 111

Abbildung 5-1 Belastung verschiedener Energieträger (je kWh) durch staatlich veranlasste und regulierte Abgabe* ... 123

Abbildung 5-2 Effektive Besteuerung des Energiegehalts, nach Verwendungsbereichen, in EUR/GJ ... 124

Abbildung 5-3 Umweltschädliche Subventionen im Verkehr ... 128

Abbildung 5-4 Aufmerksamkeitszyklen alternativer Antriebe ... 131

Abbildung 5-5 Entfernung zur nächsten Haltestelle des öffentlichen Verkehrs ... 158

Abbildung 5-6 Differenzierung der Angebotsformen (einschl. flexibler Angebotsformen) ... 161

Vorabfassung - wird durch die endgültige Fassung ersetzt.

Tabellenverzeichnis

Tabelle 2-1 Sektorspezifische Emissionsminderungsziele des deutschen Klimaschutzplanes 2050 31

Tabelle 3-1 Stromnachfrage und Dekarbonisierung in verschiedenen Szenarien 48

Tabelle 3-2 Stromerzeugung und Kapazitäten in verschiedenen Szenarien 52

Tabelle 4-1 Vergleich der spezifischen CO_2-Emissionen und des Energieverbrauchs einzelner Verkehrsmittel im Güterverkehr (Bezugsjahr: 2014) 71

Tabelle 4-2 Aggregierte Treibhausgasminderungsziele für den Verkehrssektor in der EU 76

Tabelle 4-3 Spezifische Treibhausgasminderungsziele für den Verkehrssektor 76

Tabelle 4-4 Ziele zur Effizienzsteigerung bei verschiedenen Verkehrsträgern 77

Tabelle 4-5 Verkehrsprognose 2030: Entwicklung von Fahrleistung, Energieverbrauch und CO_2-Emissionen des Straßenverkehrs 81

Tabelle 4-6 Rohstoffbedarf für Systemkomponenten von konventionellen, batterieelektrischen oder Antrieben mit Brennstoffzellen 2010 90

Tabelle 4-7 Verkehrsaufkommen in Deutschland 2010 nach Verkehrsmitteln und Entfernungsklassen (in Mio. Personenfahrten/Jahr) 98

Tabelle 4-8 Entwicklung der Verkehre 101

Tabelle 4-9 Ko-Benefits der Verkehrswende für andere lokale Umweltaspekte in der Nutzungsphase 102

Tabelle 4-10 Automatisierungsgrade von autonomen Fahrzeugen 116

Tabelle 4-11 Ökologische Auswirkungen von autonomen Fahrzeugen auf den Energieverbrauch 120

Tabelle 5-1 Vor- und Nachteile verschiedener potenzieller Metriken zur Effizienzregulierung 137

Tabelle 5-2 Gesamtplanwirkung der Investitionsszenarien 157

Tabelle 5-3 Umweltbetroffenheiten für die untersuchten Gesamtplan-Szenarien 159

Tabelle 5-4 Anteil des motorisierten Individualverkehrs am Modal Split (Fahrende + Mitfahrende) 161

Vorabfassung - wird durch die endgültige Fassung ersetzt.

Vorabfassung - wird durch die endgültige Fassung ersetzt.

Kurzfassung

Verkehrssektor als größte klimapolitische Herausforderung

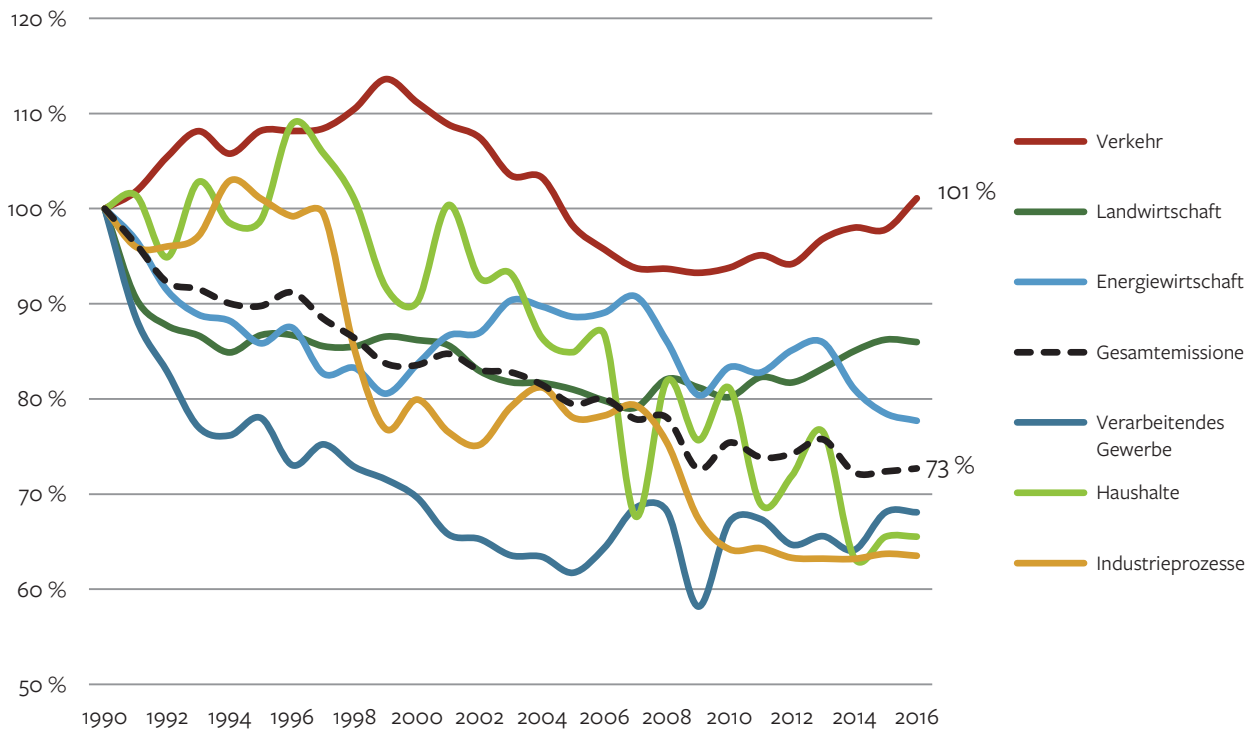
Der durch menschliche Aktivitäten verursachte Klimawandel hat bereits heute, bei einer globalen Mitteltemperatur, die gegenüber dem letzten Jahrhundert um etwa 1 °C erhöht ist, besorgniserregende Auswirkungen auf Mensch und Umwelt. Im Klimaabkommen von Paris wurde das Ziel vereinbart, den Anstieg auf „deutlich unter 2 °C“ zu begrenzen. Gelingt dies nicht, drohen dramatische, irreversible Folgen. Extremereignisse wie die schweren Stürme und Überschwemmungen des Jahres 2017 sollten ein Weckruf für die globale Weltgemeinschaft sein.

Die Bundesregierung hat sich – ebenso wie die EU – das Ziel gesetzt, die Treibhausgasemissionen bis 2050 um 80 bis 95 % gegenüber 1990 zu senken. Der Sachverständigenrat für Umweltfragen (SRU) empfiehlt eine Minderung um 95 % anzustreben, da Deutschland nur so einen angemessenen Beitrag zu den in Paris vereinbarten Klimaschutzzielen leistet. Dafür ist eine umfassende Dekarbonisierung, also ein weitestgehender Verzicht auf die Verbrennung fossiler Energieträger, erforderlich. Dabei stehen alle Sektoren in der Pflicht, ihren Treibhausgasausstoß drastisch zu senken.

Der Verkehrssektor ist derzeit für etwa ein Fünftel der Treibhausgasemissionen Deutschlands verantwortlich. Während in anderen Sektoren seit 1990 zum Teil deutliche Emissionsminderungen erzielt wurden, sind die Emissionen des Verkehrs im gleichen Zeitraum sogar leicht angestiegen (Abb. 1). Der größte Teil der Treibhausgasemissionen stammt dabei aus dem Straßenverkehr. Verbesserungen der Fahrzeugeffizienz sind durch die gleichzeitige Zunahme der Verkehrsleistung, der Motorenleistung und des Gewichts der Fahrzeuge aufgezehrt worden. Spätestens bis zur Mitte des Jahrhunderts sollte auch der Verkehr nahezu vollständig treibhausgasneutral sein. Angesichts eines knappen verbleibenden Emissionsbudgets, das noch mit den Paris-Zielen vereinbar ist, ist ein unverzügliches und konsequentes Umsteuern erforderlich. Der Klimaschutzplan 2050 der Bundesregierung hat für den Verkehr das ambitionierte Zwischenziel einer Treibhausgasminderung von 40 bis 42 % bis zum Jahr 2030 gesetzt.

Abbildung 1

Treibhausgasemissionen ausgewählter Sektoren in Deutschland (1990–2016)



SRU 2017; Datenquelle: UBA 2017h; 2017g

Verkehrswende als Chance für eine Minderung der Umwelt- und Gesundheitsbelastungen

Insbesondere der Straßenverkehr hat viele negative Auswirkungen auf Natur, Umwelt und Gesundheit. Mit etwa 38 % im Jahr 2015 war er der Hauptemittent von anthropogenen Stickstoffoxiden (NO_x). In den Städten wird der zulässige Jahresbelastungshöchstwert für Stickstoffdioxid (NO_2) vielerorts überschritten. Auch die Feinstaubbelastung wird wesentlich durch den Straßenverkehr mitverursacht. Fast die Hälfte der Menschen fühlt sich in ihrem Wohnumfeld durch Straßenverkehrslärm belästigt. Der Verkehr nimmt zudem erhebliche Flächen in Anspruch. Einkommensschwache Haushalte sind in besonderem Maße von Luft- und Lärmbelastungen sowie vom Fehlen hochwertiger Freiflächen betroffen. Schließlich trägt der Verkehr stark zum Verlust und zur Fragmentierung von Lebensräumen für Pflanzen und Tiere bei. Eine Verkehrswende birgt die Chance, diese vielfältigen Belastungen deutlich zu mindern und die Lebensbedingungen der Menschen positiv zu beeinflussen.

Verkehrswende als wichtige Zukunftsaufgabe für Politik und Wirtschaft

Das automobilgeprägte Verkehrssystem in Deutschland stellt ein seit Jahrzehnten stabiles Gefüge dar, bei dem Veränderungen schwer zu erreichen sind. Dennoch wird die Zukunft des Verkehrs zunehmend offener und kontroverser diskutiert. Der Klimaschutz ist dabei ein wichtiger Treiber, ebenso wie die politische und juristische Diskussion über die Luftqualität in den Städten, die sich

Vorabfassung - wird durch die endgültige Fassung ersetzt.

durch den Dieselskandal zugespitzt hat. Doch auch internationale Entwicklungen fordern den Automobilsektor heraus. Die Ankündigung Chinas, ab 2019 eine Quote von 10 % für Fahrzeuge mit elektrischem Antrieb einzuführen, zwingt die deutschen Fahrzeughersteller zum Handeln. Gleichzeitig ist absehbar, dass technologische Entwicklungen wie die Digitalisierung – und hierbei insbesondere das autonome Fahren – die Mobilitätslandschaft grundlegend verändern werden. Eine innovative und nachhaltige Verkehrspolitik ist somit nicht nur ein umwelt- und klimapolitisches Gebot, sondern auch eine zentrale Bedingung für die zukünftige Wettbewerbsfähigkeit der deutschen Industrie. Die Umgestaltung eines Bereichs, der viele Menschen in ihrem Alltag unmittelbar betrifft, erfordert jedoch die Akzeptanz der Bevölkerung. Es ist deshalb Aufgabe der Politik, die anstehende Verkehrswende im Dialog mit allen Akteuren zu planen und dann mutig anzugehen.

Notwendigkeit einer Kombination von Vermeidung, Verlagerung, Effizienz und neuen Antrieben

Angesichts der vielfältigen negativen Umwelt- und Gesundheitswirkungen des Verkehrs kann eine nachhaltige Mobilität nur durch die Kombination verschiedener Strategien erreicht werden: Erforderlich ist, dass sich Mobilitätsmuster und die Organisation des Verkehrs in weiten Bereichen verändern. Zentrales Element eines klimagerechten und nachhaltigen Verkehrssystems muss die Verringerung des motorisierten Individualverkehrs sowie die Stärkung intelligenter und integrierter Mobilitätslösungen sein. Verkehrsvermeidung und eine Verlagerung auf Schiene, ÖPNV, Rad- sowie Fußverkehr verringern nicht nur die Emission von Treibhausgasen und den Energieverbrauch, sondern mindern auch weitere Probleme des Verkehrs wie Flächenverbrauch, Lärm und Unfallrisiken.

Ein weiterer wichtiger Hebel für die Dekarbonisierung des Verkehrs ist eine technologische Transformation bei den Antrieben, die den Umstieg von fossilen auf erneuerbare Energien unterstützt. Gleichzeitig muss zudem eine offensive Effizienzstrategie verfolgt werden: Zum einen muss die Energieeffizienz von Pkw und Lkw mit Verbrennungsmotoren verbessert werden, da in den nächsten eineinhalb Dekaden noch eine große Anzahl dieser Fahrzeuge neu zugelassen werden. Einige von ihnen werden bis mindestens in die 2040er-Jahre im Fahrzeugbestand verbleiben. Ohne eine stetige Verbesserung der Energieeffizienz der Fahrzeuge drohen die kumulierten Emissionen aus dem Straßenverkehr bereits innerhalb der nächsten 15 Jahre ein mit den Paris-Zielen zu vereinbarendes Kohlenstoffdioxid-Budget (CO_2-Budget) für den Verkehrssektor zu übersteigen. Zum anderen müssen auch Fahrzeuge mit alternativen Antrieben möglichst energieeffizient sein, um den Energieverbrauch, und damit den erforderlichen Zubau Erneuerbarer-Energien-Anlagen, zu begrenzen. Die Umstellung auf alternative Antriebstechnologien – inklusive der notwendigen Infrastruktur und Stromerzeugung – wird zu einer verstärkten Nachfrage nach bestimmten Rohstoffen führen. Diese Rohstoffe werden größtenteils außerhalb der EU gewonnen, oft mit starken lokalen und regionalen Umwelt-, Gesundheits- und Sozialwirkungen. Es muss zügig darauf hingearbeitet werden, Rohstoffe umwelt- und sozialgerecht zu gewinnen und am Lebensende der Produkte hochwertig im Kreislauf zu führen. Dies reduziert nicht nur die Nachfrage nach Primärrohstoffen und die damit verbundenen Umweltauswirkungen, sondern verbessert auch die ökologische Gesamtbilanz.

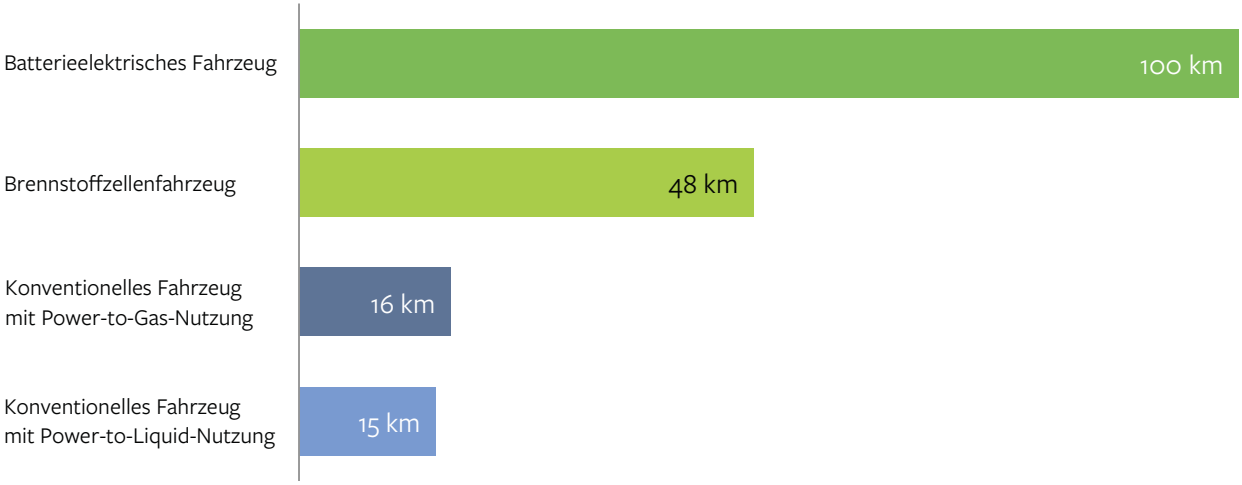
Vorteile der Elektromobilität

Die direkte Elektrifizierung – das heißt die Umstellung auf Elektromobilität – ist aufgrund ihres sehr hohen Wirkungsgrads besonders geeignet, die Klima- und Umweltauswirkungen des Verkehrs grundlegend zu verringern. Zudem emittieren elektrische Antriebe lokal keine Schadstoffe. Eine großflächige Nutzung strombasierter synthetischer Kraftstoffe würde aufgrund hoher Umwandlungsverluste mit einem um ein Vielfaches größeren Strombedarf einhergehen (Abb. 2). Eine stark steigende Stromnachfrage hätte nicht nur enorme ökologische, sondern auch hohe wirtschaftliche Kosten. Eine verstärkte Nutzung von Biokraftstoffen aus Anbaubiomasse würde zur Verschärfung von Nutzungskonkurrenzen mit der Nahrungsmittelerzeugung sowie der stofflichen Nutzung führen und wäre oftmals weder sozial noch ökologisch nachhaltig. Es sollten daher jene Verkehrsmodi weitgehend auf elektrische Antriebe umgestellt werden, bei denen eine direkte Elektrifizierung technisch umsetzbar und wirtschaftlich darstellbar ist. Neben dem Schienenverkehr, der bereits heute größtenteils elektrifiziert ist, eignet sich dafür vor allem der Straßenverkehr.

Vorabfassung - wird durch die endgültige Fassung ersetzt.

Abbildung 2

Reichweite von Pkw mit unterschiedlichen Technologien (bei 15 kWh Primärenergieeinsatz)



SRU 2017; Datenquelle: KREYENBERG et al. 2015, S. 15

Aufgrund der vielfältigen Vorteile der Elektromobilität wäre eine Strategie der Technologieneutralität im Straßenpersonenverkehr verfehlt. Zudem würde ein vermeintlich technologieneutraler Regulierungsrahmen angesichts der privilegierten Ausgangslage des Verbrennungsmotors die neuen Technologien benachteiligen. Um anfängliche Hemmnisse neuer Technologien (z. B. bei der Energieversorgungsinfrastruktur oder den anfänglich höheren Produktionskosten) zu überwinden, ist eine gezielte Technologieförderung sinnvoll.

Dabei sollte der Fokus der Förderung nach Ansicht des SRU zunächst vor allem auf batterieelektrische Fahrzeuge gerichtet werden. Fahrzeuge mit Brennstoffzellenantrieb sind aufgrund ihrer Wirkungsgradnachteile und ihrer absehbar höheren Kosten für einen breiten Einsatz nach heutigen Erkenntnissen weniger geeignet. Eine Förderung von Erdgasantrieben als „Brückentechnologie“ hält der SRU für nicht zielführend, da diese immer noch relativ hohe CO_2-Emissionen besitzen und Investitionen in hocheffiziente elektrische Antriebe langfristig sinnvoller sind. Auch für leichte Nutzfahrzeuge und Verteilverkehre ist eine umfassende Marktdurchdringung vor allem batterieelektrischer Antriebe sinnvoll. Im Straßengüterfernverkehr sind Oberleitungs-Lkw eine technisch umsetzbare Option. Insgesamt muss die Umstellung bei den Neuzulassungen mit Blick auf die Nutzungsdauer der Fahrzeuge bis spätestens Mitte der 2030er-Jahre abgeschlossen sein.

Die Nutzung synthetischer Kraftstoffe sowie begrenzter Mengen nachhaltiger Biokraftstoffe sollte somit möglichst auf jene Einsatzbereiche beschränkt bleiben, in denen eine direkte Elektrifizierung technisch oder ökonomisch nicht realisierbar ist. Dies betrifft weite Teile des Luft- und Seeverkehrs, die nach derzeitigem Stand nicht direkt elektrifizierbar sind, da Kraftstoffe im Vergleich zu Batterien eine höhere Energiedichte aufweisen. Auch mit Blick auf die zu schaffenden Infrastrukturen sollten diejenigen Technologien gefördert werden, die langfristig die Einhaltung der Klimaziele gewährleisten. So wird verhindert, dass die Infrastruktur mehrfach – unter hohen Kosten – angepasst oder parallel betrieben werden muss.

Empfehlungen des SRU für die neue Legislaturperiode

Zentrale strategische Weichen für die Verkehrswende sollten in der neuen Legislaturperiode gestellt werden. Dabei bilden der Klimaschutzplan 2050 der Bundesregierung und das darin vorgesehene Klimaschutzkonzept Straßenverkehr einen sinnvollen Rahmen für klimapolitische Maßnahmen im Verkehrssektor. Es ist eine konsistente Gesamtkonzeption erforderlich, die den betroffenen Akteuren Planungssicherheit bietet und damit langfristige Investitionsentscheidungen ermöglicht. Die nachfolgend skizzierten Empfehlungen stellen nach An-

Vorabfassung - wird durch die endgültige Fassung ersetzt.

sicht des SRU notwendige Bausteine eines solchen Konzepts dar, wobei ein Fokus auf den Mittelstrecken- und Fernverkehren liegt.

1. Reform von Steuern und Abgaben

Das historisch gewachsene System der energiebezogenen Steuern und Abgaben enthält eine Reihe von Hemmnissen für einen effizienten Klimaschutz im Verkehrssektor, gerade auch für eine verstärkte Nutzung von erneuerbarem Strom. Der SRU empfiehlt der Bundesregierung, ein Reformkonzept zu erarbeiten, das den Herausforderungen gerecht wird, die von Klimaschutz, Sektorkopplung und fluktuierender Stromerzeugung ausgehen. Die Steuersätze für die verschiedenen Energieträger im Verkehrsbereich sollten an ihrem jeweiligen spezifischen Treibhausgasgehalt sowie ihrem Energiegehalt ausgerichtet werden. Eine gute Ausgangsbasis hierfür bildet der – letztlich nicht beschlossene – Vorschlag der Europäischen Kommission zur Reform der Energiesteuerrichtlinie. Insgesamt spricht sich der SRU für eine verstärkte Ökologisierung des Steuersystems aus. Seit Jahren sinkt der Anteil der umweltbezogenen Steuereinnahmen, und die reale Abgabenbelastung von Kraftstoffen nimmt ab.

Prioritär sollte das Ende der Dieselprivilegierung eingeleitet werden. Die niedrige Besteuerung von Dieselkraftstoff ist weder ökologisch gerechtfertigt, noch berücksichtigt sie die negativen gesundheitlichen Effekte der Emissionen. Die Dieselprivilegierung hat dazu beigetragen, dass Dieselfahrzeuge in der Vergangenheit immer schwerer und mit immer größerer Motorisierung ausgestattet wurden, wodurch der Effizienzvorteil des Dieselmotors aufgezehrt wurde. Auch die Privilegierung von Erdgas als Kraftstoff im Verkehrssektor sollte nicht erneut über 2026 hinaus verlängert werden.

Die höhere Abgabenbelastung von Strom gegenüber fossilen Kraftstoffen hemmt die angestrebte Elektrifizierung des Verkehrs. Strom sollte daher als Energieträger im Verkehr – zumindest relativ – entlastet werden. Zudem sollten die Abgaben im Strombereich dynamisiert werden, damit Nutzerinnen und Nutzer einen stärkeren Anreiz haben, ihren Stromverbrauch an den Erfordernissen eines auf erneuerbaren Energien basierenden Energiesystems auszurichten.

Generell sollte der Abbau von umweltschädlichen Subventionen ein zentrales Ziel für die neue Legislaturperiode sein. Allein im Verkehrssektor belaufen sich die umweltschädlichen Subventionen auf annähernd 30 Mrd. Euro jährlich. Dabei sind vor allem die Entfernungspauschale sowie die niedrige pauschale Besteuerung privat genutzter Dienstwagen zu nennen.

2. Zulassungsquote für elektrische Antriebe

Um die notwendige technologische Transformation zügig einzuleiten, sollte im Segment der Pkw und leichten Nutzfahrzeuge eine Quote für elektrische Antriebe eingeführt und schrittweise erhöht werden. Vorteil einer Quotenregelung gegenüber anderen Anreizinstrumenten zur Förderung alternativer Antriebe ist, dass die technologiepolitischen Ziele sicher erreicht werden. Damit können zum einen Hersteller planungssicher in den Markthochlauf dieser Technologien investieren. Zum anderen wird es wirtschaftlich attraktiver, die benötigte Energieversorgungsinfrastruktur aufzubauen.

Der SRU schlägt für das Jahr 2025 eine verbindliche Quote für den Anteil rein elektrischer Fahrzeuge (d. h. batterieelektrische und Brennstoffzellenfahrzeuge) an den Neuwagenzulassungen in Höhe von mindestens 25 % vor. Plug-in-Hybrid-Fahrzeuge sollten in dem System ebenfalls anrechenbar sein, aber mit einer im Vergleich zu vollelektrischen Fahrzeugen verringerten Wertigkeit. Zudem sollte eine Erhöhung der Quote auf mindestens 50 % bis 2030 bereits heute festgeschrieben werden, wobei über die exakte Höhe nach einer Zwischenevaluation spätestens im Jahr 2025 entschieden werden sollte. Dieser deutliche Anstieg der Quote erscheint realistisch, da zu erwarten ist, dass sich die Elektromobilität nach dem Überwinden einer gewissen Schwelle zügig durchsetzen wird.

3. Ambitionierte Grenzwerte und fiskalische Anreize zur Verbesserung der Fahrzeugeffizienz

Derzeit bilden die europäischen CO_2-Flottengrenzwerte für Pkw und leichte Nutzfahrzeuge das zentrale Instrument zur Verbesserung der Fahrzeugeffizienz. Der SRU empfiehlt der Bundesregierung, sich für eine rasche Einigung auf anspruchsvolle Zielvorgaben für CO_2-Flottengrenzwerte für die Jahre 2025 und 2030 einzusetzen. Um der zunehmenden Diversifizierung der Antriebstechnologien gerecht zu werden und die Energieeffizienz

Vorabfassung - wird durch die endgültige Fassung ersetzt.

aller Fahrzeuge weiter zu verbessern, sollte die Regulierung strukturell weiterentwickelt werden. An die Stelle der CO_2-Flottengrenzwerte sollten Flottenzielwerte für den durchschnittlichen Endenergieverbrauch treten. Sie sollten zudem mit antriebsspezifischen Mindesteffizienzvorgaben – insbesondere für Fahrzeuge mit Verbrennungsmotor – kombiniert werden („duale Effizienzregulierung"). Durch die Regulierung des Endenergieverbrauchs würden auch für Elektrofahrzeuge Effizienz-Anreize gesetzt. Zudem würde der Tatsache Rechnung getragen, dass jegliche Form von Energieerzeugung mit Beeinträchtigungen der Umwelt verbunden ist. Durch technologiespezifische Vorgaben kann sichergestellt werden, dass für jede Antriebstechnologie ein Mindestmaß an wirtschaftlichen Effizienzverbesserungen realisiert wird. Die Grenzwerte sollten sich zukünftig am Realverbrauch auf der Straße orientieren und nicht lediglich Messergebnisse auf dem Prüfstand berücksichtigen. Die herstellerspezifischen Effizienzvorgaben sollten außerdem künftig nicht mehr gewichtsabhängig sein, um Anreize zur Gewichtsreduktion zu stärken.

Für schwere Nutzfahrzeuge des Straßengüterverkehrs existieren auf EU-Ebene, im Unterschied zu vielen anderen Fahrzeugmärkten weltweit, bisher keine CO_2-Flottengrenzwerte oder andere Effizienzvorgaben. Die Bundesregierung sollte die Einführung ambitionierter europäischer CO_2- bzw. Energieverbrauchsgrenzwerte spätestens bis zum Jahr 2025 unterstützen. Aufgrund der vergleichsweise schnellen Flottenerneuerung schwerer Nutzfahrzeuge ließen sich hierdurch die spezifischen CO_2-Emissionen des Straßengüterverkehrs bis 2030 deutlich mindern. Der Regulierungsansatz sollte sich dabei nicht allein auf die Motoreneffizienz fokussieren, weil weitere Potenziale zur Verbesserung der Gesamtenergieeffizienz im Bereich Aerodynamik, bei der Verringerung des Rollwiderstandes und bei Gewichtseinsparungen liegen.

Als Ergänzung zu ordnungsrechtlichen Vorgaben auf europäischer Ebene empfiehlt der SRU eine Stärkung fiskalischer Effizienzanreize, um die Robustheit der Effizienzregulierung zu verbessern und die Flottenerneuerung zu beschleunigen. Es sollte vorübergehend ein Bonus-Malus-System eingeführt werden, durch das der Kauf besonders energieeffizienter Fahrzeuge finanziell unterstützt und der Kauf ineffizienter Fahrzeuge zusätzlich belastet wird. Zudem sollte die CO_2-abhängige Kfz-Besteuerung beibehalten und ihre Anreizwirkung gestärkt werden. Alternativ sollte eine energieverbrauchsabhängige Kfz-Besteuerung eingeführt werden.

4. Streckenabhängige Pkw-Maut

Bestehende Mautsysteme dienen bislang überwiegend der Deckung von Wegekosten. Zukünftig können sie aber auch als wichtiges Steuerungsinstrument für die Verkehrsverlagerung, -vermeidung und -lenkung sowie zur Effizienzverbesserung und Flottenerneuerung fungieren. Um die Kostenwahrheit im Verkehr zu fördern und CO_2-Emissionen zu vermindern, sollte die in der letzten Legislaturperiode beschlossene Pkw-Maut zu einer streckenabhängigen Maut fortentwickelt werden. Die Einführung einer solchen entfernungsabhängigen Pkw-Maut ist insbesondere auch angesichts einer zu erwartenden Verbreitung autonomer Fahrzeuge geboten, um unnötige Leerfahrten zu vermeiden, einen weiteren Anstieg der Beförderungsleistung zu verhindern und die intermodale Nutzung autonomer Fahrzeuge in Kombination mit dem ÖPNV finanziell anzureizen. Die weitere Ausdifferenzierung einer solchen Maut nach ökologischen oder verkehrstechnischen Kriterien kann sinnvoll sein, muss aber im Hinblick auf Datenschutz, Erhebungsaufwand und Verbraucherschutz abgewogen werden.

5. Ausbau der Energieversorgungsinfrastruktur

Um die Marktdurchdringung elektrischer Antriebe zu fördern, muss zügig eine bedarfsgerechte Ladeinfrastruktur aufgebaut werden. Diese Investitionen sollten durch den Bund vorübergehend staatlich gefördert werden. Das derzeitige Programm des Bundes, das 300 Mio. Euro in der Förderperiode 2017 bis 2020 bereitstellt, sollte daher fortgeführt und erweitert werden. Wie lange die staatliche Förderung notwendig sein wird, lässt sich derzeit noch nicht genau abschätzen. Da die Wirtschaftlichkeitsschwelle der Bereitstellung von Ladeinfrastruktur nicht in allen Regionen zeitgleich erreicht werden wird, kann zukünftig ein räumlich differenzierter Förderansatz erforderlich sein.

Da ungefähr 85 % aller Ladevorgänge im privaten Bereich stattfinden, sollten bindende Vorgaben für die Bereitstellung von Ladeinfrastrukturen bei Neubauten auf EU-Ebene gemacht werden. Die gegenwärtigen rechtlichen Rahmenbedingungen erschweren Mietern und Gemeinschaftseigentümern den Einbau von Ladestellen für Elektrofahrzeuge an ihrem privaten Kfz-Stellplatz. Um den Auf- und Ausbau privater Ladepunkte zu fördern, sind deshalb, wie durch den Gesetzgeber geplant, Anpassungen im Bau-, Wohneigentums- und Mietrecht notwendig. Zudem sollten auch private Arbeitgeber verpflichtet

Vorabfassung - wird durch die endgültige Fassung ersetzt.

werden, Ladeinfrastruktur auf ihren Firmenparkplätzen bereitzustellen.

Oberleitungen sind eine technisch umsetzbare Option, um im Fernverkehr mit schweren Lkw, der für circa 80 % der CO_2-Emissionen im Straßengüterverkehr verantwortlich ist, die Wirkungsgradvorzüge der direkten Elektrifizierung zu nutzen. Studien zufolge kann bereits durch die Elektrifizierung eines Drittels des deutschen Autobahnnetzes (d. h. ca. 4.000 km) ein elektrischer Fahranteil von circa 60 % erreicht werden. Sind die (auch in Deutschland durchgeführten) Demonstrationsprojekte erfolgreich, empfiehlt der SRU dem Bund, die Elektrifizierung von hochfrequentierten Autobahnabschnitten mit geeigneten Start-Ziel-Relationen zu planen und beispielsweise über die Lkw-Maut zu finanzieren.

6. Gewinnung und Kreislaufführung benötigter Rohstoffe

Die Elektromobilität hat in der Nutzungsphase deutlich geringere Umweltwirkungen als der Verkehr mit Verbrennungsmotoren, da weniger Lärm und geringere Emissionen anfallen (CO_2, NO_x, Feinstaub). In der Vorkette – Rohstoffförderung und -aufbereitung – verschieben sich die Umweltwirkungen, weil statt Erdöl andere Rohstoffe für die Motor- und Batterietechnik sowie für die Erzeugung erneuerbarer Energien benötigt werden. Der Bedarf an Lithium, Seltenen Erden, Kobalt, Platin und Kupfer wird deutlich steigen.

Gewinnung und Verarbeitung von Rohstoffen für die Verkehrswende müssen mittelfristig internationalen Umwelt- und Sozialstandards genügen. Die Bundesregierung sollte dazu Instrumente wie Rohstoffpartnerschaften, Zertifizierung und internationale Zusammenarbeit in Kooperation der Ressorts Umwelt, Wirtschaft sowie wirtschaftliche Zusammenarbeit und Entwicklung deutlich ausbauen. Zudem sollte sie auf der nationalen und europäischen Ebene den Aufbau eines Rohstoffinventars forcieren, damit die Wirtschaft den Aufbau von Recyclingstrukturen planen und erwartbare Sekundärrohstoffmengen langfristig abschätzen kann. Auch der Forschungsbedarf für Behandlungs- und Recyclingtechnologien sowie Defizite im Aufbau der benötigten Infrastrukturen können hieraus abgeleitet werden. Erfasst werden sollten dabei mittelfristig nicht nur Fahrzeuge, sondern auch andere Produkte, darunter insbesondere die für die Energieerzeugung und -speicherung installierten Technologien, aber auch Endverbraucherprodukte wie elektrische und elektronische Geräte. So kann festgestellt werden, ob ähnliche Abfallströme verschiedener Produkte gleichzeitig anfallen und für das Recycling zusammengeführt werden können. Möglich wäre, das Inventar bei der Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe in Zusammenarbeit mit dem Umweltbundesamt anzusiedeln, um eine direkte Verknüpfung mit dem Thema Rohstoffbedarfe zu erreichen.

Die Bundesregierung sollte die Zulassung neuer Fahrzeugtypen (aller Antriebs- und Fahrzeugarten) mit der Bereitstellung eines „Kreislaufpasses“ verknüpfen, in dem die Hersteller Informationen zu Rohstoffen (Grundlage für das Inventar), Demontagepläne und eine Verwertungsplanung zur Verfügung stellen. Dafür ist bereits bei der Produktentwicklung ein umfassendes Konzept zu erarbeiten, das sowohl die Demontagefähigkeit als auch die hochwertige Verwertung ermöglicht.

Die Begriffe Recycling und stoffliche Verwertung sind mit dem Anspruch „gleicher oder höherwertiger Einsatz“ klar zu definieren und in den relevanten Gesetzes- und Verordnungstexten zu verankern. Die Bundesregierung sollte sich auch auf europäischer Ebene für eine Konkretisierung dieser Begriffe engagieren. Für die Verwertungswege sind beste verfügbare Techniken zur Erreichung einer hochwertigen stofflichen Verwertung zu bestimmen. Um die Erarbeitung und konkrete Implementierung spezifischer Anforderungen für Elektrofahrzeuge voranzubringen, sollte sich die Bundesregierung auf europäischer Ebene dafür einsetzen, dass die Altfahrzeug- und die Batterie-Richtlinie zügig an die neuen Herausforderungen der Elektromobilität und mit Blick auf eine hochwertige Verwertung angepasst werden.

7. Fortentwicklung der Verkehrsinfrastrukturplanung zu einer Bundesmobilitätsplanung

Der Bundesverkehrswegeplan ist das wichtigste Steuerungsinstrument für die Verkehrsinfrastrukturplanung in der Zuständigkeit des Bundes. Aus Klimaschutz- und Nachhaltigkeitssicht sind Verkehrs- und Mobilitätskonzepte ausschlaggebend, die sich an den jeweiligen Raum- und Infrastrukturgegebenheiten orientieren und deren verkehrliche, räumliche, gesundheitliche und umweltbezogenen Wirkungen berücksichtigen. Dies ist bei der derzeitigen Bundesverkehrswegeplanung nicht in ausreichendem Maß der Fall. Die Auswahl der (Aus-)Bauprojekte erfolgt zudem im Wesentlichen auf Nutzen-Kosten-Bewertungen, obwohl die Vergleichbarkeit dieser

Vorabfassung - wird durch die endgültige Fassung ersetzt.

Analysen über verschiedene Projektarten und Verkehrsträger methodisch nur eingeschränkt möglich ist. Der Bundesverkehrswegeplan 2030 verfehlte zudem elf der zwölf von der Bundesregierung aufgestellten Umweltziele.

Der SRU empfiehlt deshalb, die Bundesverkehrswegeplanung zu einer integrierten Bundesmobilitätsplanung fortzuentwickeln, die alle überregionalen Verkehrsträger (Straße, Schiene, Schiff, Luftverkehr) umfasst, einschließlich einer konsistenten bundesweiten Flughafenplanung. Dies erfordert eine Abkehr von der rein nachfrageseitigen Begründung der Verkehrsplanung, hin zu einer integrierten Raum- und Verkehrsplanung. Diese sollte – unter der Voraussetzung eines leistungsfähigen Verkehrssystems – anstreben, die Verkehrsleistung zu verringern und die Umwelt- und Gesundheitswirkungen des Verkehrs unter Beibehaltung der erforderlichen Mobilität zu minimieren.

8. Behutsame Reform des Personenbeförderungsgesetzes

Im ländlichen Raum ist die Mobilität durch den Linienverkehr vielfach kaum gewährleistet, selbst ein verlässlicher Taxiverkehr ist in manchen Regionen nicht mehr wirtschaftlich. Als Antwort darauf entstehen flexible Bedienformen und ehrenamtliche Angebote, die allerdings teilweise vor genehmigungsrechtlichen Hürden stehen. Schließlich stehen durch die Digitalisierung neue appbasierte Dienste zur Verfügung, die aber nicht immer die rechtlichen Anforderungen zur gewerblichen Beförderung erfüllen.

Vor diesem Hintergrund wird gegenwärtig eine Reform des Personenbeförderungsgesetzes diskutiert. Vorgeschlagen wird eine sehr weitgehende Deregulierung der Personenbeförderung. Diejenigen, die dies befürworten, hoffen, dass insbesondere die Mobilität im ländlichen Raum durch neue Angebote gesichert werden kann. Es ist aber ungewiss, ob diese Angebote im ländlichen Raum tatsächlich entstehen würden. Zudem besteht die Gefahr, dass eine Deregulierung den bestehenden ÖPNV gerade in der Stadt schwächt. Der SRU spricht sich deshalb für einen Mittelweg aus: Neue, innovative Angebote sollten in die bestehenden Nahverkehrspläne eingebunden werden. Außerdem sollten die Voraussetzungen dafür geschaffen werden, dass klassische flexible Bedienformen, wie zum Beispiel Rufbusse, sicher genehmigungsfähig sind.

9. Emissionsminderungen in der Seeschifffahrt

Langfristig sollten im Schiffsverkehr synthetische Energieträger auf Basis erneuerbarer Energien eingesetzt werden. Bereits heute besteht technisch die Möglichkeit, Schiffsantriebe von Schweröl und Diesel auf fossiles Erdgas (Liquified Natural Gas – LNG) umzustellen und damit den Ausstoß von Treibhausgasen und Luftschadstoffen stark zu senken. Sukzessive kann fossiles durch regenerativ erzeugtes Gas ersetzt werden. Es bestehen allerdings große Hemmnisse für den Einsatz von LNG. Die Kosten für eine Umstellung auf LNG sind angesichts von Überkapazitäten im Seegüterverkehr schwer zu refinanzieren. Zudem ist die Infrastruktur in den Häfen für die Betankung (sog. Bunkerung) teilweise unzureichend oder nicht vorhanden.

Eine Dekarbonisierung der Seeschifffahrt erfordert politische Maßnahmen auf allen Ebenen. Da der Seegüterverkehr ein globaler Wirtschaftszweig ist, sollten Treibhausgasminderungsziele mit dem Ziel einer vollständigen Dekarbonisierung bis 2050 im Rahmen der International Maritime Organization (IMO) angestrebt werden. Auch auf europäischer Ebene sollte die Bundesregierung für eine ambitionierte Rahmensetzung eintreten. Notwendig wäre eine europaweite CO_2-Bepreisung von Schiffskraftstoffen, um eine Verlagerung des Bunkerns von Kraftstoff in Häfen ohne CO_2-Bepreisung möglichst zu vermeiden. Europäische Initiativen zur Minderung von Schadstoffemissionen im Seeverkehr haben gezeigt, dass Europa eine Vorreiterrolle spielen und die Regelungen der IMO beeinflussen kann.

Der Environmental Ship Index – ein in allen bedeutenden europäischen Häfen etabliertes freiwilliges Bonussystem – sollte weiterentwickelt werden. Einerseits sollte der bislang vor allem Luftschadstoffe umfassende Index stärker auf den Klimaschutz ausgerichtet werden. Andererseits sollte er zu einem Malussystem umgestaltet werden, in dem Liegegebühren für Schiffe mit hohen Emissionen von Luftschadstoffen und Treibhausgasen mit Aufschlägen versehen werden.

Auf nationaler Ebene empfiehlt der SRU eine Abschaffung der steuerlichen Privilegierung von Schiffskraftstoffen als ersten Schritt hin zu mehr Kostenwahrheit. Die Versorgung mit LNG sollte ohne zusätzliche Kosten für die Schiffe möglich sein. Daher sollte die Bundesregierung zunächst mit den Bundesländern einheitliche Regelungen vereinbaren.

Vorabfassung - wird durch die endgültige Fassung ersetzt.

10. Stärkung des Klimaschutzes im Luftverkehr

Die klimaneutrale Ausgestaltung des Luftverkehrs erfordert Maßnahmen auf internationaler, europäischer und nationaler Ebene. International sollte kurzfristig CORSIA, das marktbasierte Instrument zur Reduktion der Treibhausgaswirkungen des Luftverkehrs, anspruchsvoller ausgestaltet werden. Insbesondere sollte es auch beim Einsatz von Bio- oder stromgenerierten Kraftstoffen zusätzliche Offset-Verpflichtungen für deren Nicht-CO_2-Klimawirkung vorsehen, die nicht vermeidbar sind.

Auf der europäischen Ebene sollten die Reduktionsziele für den Luftverkehr im Rahmen des EU-Emissionshandels verschärft und den Zielen der anderen Sektoren angeglichen werden. Darüber hinaus sollte mittelfristig die vollständige Klimawirksamkeit des Luftverkehrs (Nicht-CO_2-Effekte) berücksichtigt werden. Außerdem sollte auf europäischer Ebene die europäische Mehrwertsteuerrichtlinie geändert werden, um grenzüberschreitende gewerbliche Flüge mehrwertsteuerpflichtig zu machen.

Auf der nationalen Ebene ist es nötig, die Subventionierung des Luftverkehrs abzubauen, indem Kerosin besteuert wird. Ein koordiniertes Vorgehen einer größeren Gruppe von Staaten ist anzustreben, damit kein Anreiz geschaffen wird, Flugkraftstoff über den Bedarf für den Hinflug hinaus mitzunehmen. Der Ausschluss der Kerosinbesteuerung in bestehenden bilateralen Luftverkehrsabkommen sollte revidiert werden. Sinnvoll wäre es zudem, die Luftverkehrsteuer weiterzuentwickeln und sie nach Klimawirkung differenziert auszugestalten.

11. Beschleunigter Ausbau der erneuerbaren Energien

Die weitgehende direkte und indirekte Elektrifizierung des Verkehrs sowie weiterer Verbrauchssektoren wird – auch bei ambitionierter Effizienzpolitik – mit einem deutlichen Anstieg der Stromnachfrage einhergehen. Damit der zusätzliche Strombedarf auch tatsächlich treibhausgasarm gedeckt werden kann, ist der Ausbau der erneuerbaren Stromgestehungskapazitäten deutlich zu beschleunigen. Die mit dem EEG 2017 angestrebten Zubauraten sind für eine Umstellung der Energiebasis auf erneuerbaren Strom nicht ausreichend. Ihre tatsächliche Realisierung ist überdies fraglich. Der zukünftige Zubaukorridor sollte sich dabei proaktiv an Stromverbrauchsszenarien orientieren, denen anspruchsvolle Klimaziele und die daraus resultierende Elektrifizierung der Verbrauchssektoren zugrunde liegen. Neben einer Anpassung der kurz- und mittelfristigen, im EEG geregelten Zubauraten sind auch die langfristigen 2050-Ziele für den Anteil der erneuerbaren Energien an der Energieversorgung insgesamt (60 %) und am Strommix (80 %) deutlich zu niedrig. Letztlich muss die Energieversorgung spätestens bis zur Mitte des Jahrhunderts nahezu vollständig auf erneuerbaren Energien beruhen.

Es ist wahrscheinlich, dass Deutschland seinen Energiebedarf langfristig nicht vollständig aus heimischen Quellen decken können wird. Dies gilt vor allem für den Bedarf an synthetischen Kraftstoffen für den Schiffs- und Flugverkehr. Die Bundesregierung sollte frühzeitig Strategien zur Erschließung geeigneter Standorte erarbeiten, die die Interessen der Produktionsländer berücksichtigen. Auch wenn synthetische Kraftstoffe im großen Maßstab außerhalb Deutschlands hergestellt werden, sollte diese wichtige Zukunftstechnologie dennoch industrie- und forschungspolitisch gefördert werden.

Ausblick

Der Verkehrssektor steht vor großen Umbrüchen, die technologisch getrieben, aber auch klima-, umwelt- und gesundheitspolitisch notwendig sind. Dabei ist der Verkehrssektor international durch eine hohe Dynamik gekennzeichnet. Im Zentrum der Aufmerksamkeit steht derzeit die Einführung von Elektrofahrzeugen. Es sollte im Bewusstsein bleiben, dass es bei der Verkehrswende nicht nur um den Umstieg auf andere Antriebstechnologien und auch nicht allein um den Klimaschutz geht. Vielmehr bietet der Wandel im Verkehrssektor die Chance, Mobilität neu zu denken und damit stärker an den Bedürfnissen der Menschen auszurichten.

Vorabfassung - wird durch die endgültige Fassung ersetzt.

Vorabfassung - wird durch die endgültige Fassung ersetzt.

Vorabfassung - wird durch die endgültige Fassung ersetzt.

1 Einleitung

Damit Deutschland einen Beitrag zur wirksamen Begrenzung des Klimawandels leisten kann, muss es seine Treibhausgasemissionen schnell und radikal senken. Dies gilt auch für den Verkehrssektor, der für ein Fünftel der Emissionen verantwortlich ist. Damit der Sektor bis 2050 weitgehend treibhausgasneutral ist, braucht es neben technologischen Veränderungen auch einen grundlegender Wandel der Verkehrssysteme und Mobilitätsmuster. Um die notwendigen Veränderungen anzustoßen, sind in der beginnenden Legislaturperiode umfassende strategische Weichenstellungen erforderlich.

1. Der Klimawandel verändert die Welt mit besorgniserregenden Folgen für Mensch und Umwelt (IPCC 2014; aktuell: O'NEILL et al. 2017). Die Erwärmung auf ein akzeptables Maß zu begrenzen ist eine Menschheitsherausforderung, der sich die Weltgemeinschaft stellen muss. Ziel des Klimaabkommens von Paris ist es, die Erhöhung der globalen Mitteltemperatur gegenüber dem vorindustriellen Zeitalter auf „deutlich unter 2 °C, möglichst 1,5 °C" zu begrenzen (UNFCCC 2015). Dieses ambitionierte Ziel erfordert eine umfassende Dekarbonisierung des Wirtschaftssystems, also einen weitgehenden Verzicht auf die Verbrennung kohlenstoffbasierter fossiler Energieträger. Hierbei kommt den Industrieländern eine besondere Verantwortung zu. Die Bundesregierung hat sich das Ziel gesetzt, die Treibhausgasemissionen bis 2030 um mindestens 55 % und bis 2050 um 80 bis 95 % gegenüber 1990 zu senken (BMWi und BMU 2010).

2. Der Verkehrssektor ist für ein Fünftel der Treibhausgasemissionen Deutschlands verantwortlich (UBA 2017i). Während in anderen Sektoren seit 1990 zum Teil deutliche Emissionsminderungen erzielt wurden, sind die Verkehrsemissionen im gleichen Zeitraum sogar leicht angestiegen. Der größte Teil dieser Treibhausgasemissionen stammt aus dem Straßenverkehr (ebd.). Zwar sind die Fahrzeuge effizienter geworden, gleichzeitig hat aber die Verkehrsleistung deutlich zugenommen. Im Klimaschutzplan 2050 hat sich die Bundesregierung für den Verkehr das Zwischenziel einer Treibhausgasminderung von 40 bis 42 % bis zum Jahr 2030 gesetzt (BMUB 2016c, S. 8). Um die Ziele des Klimaabkommens von Paris einzuhalten, muss aus Sicht des Sachverständigenrates für Umweltfragen (SRU) auch der Verkehr spätestens bis zur Mitte des Jahrhunderts nahezu vollständig treibhausgasneutral sein.

3. Der automobilgeprägte Verkehrssektor in Deutschland stellt ein sehr stabiles Gefüge dar. Im Verlauf von Jahrzehnten ist ein System gewachsen, in dem sich verschiedene soziale und technische Faktoren wie physische Infrastruktur, Mobilitätskultur, Planung und Regulierung gegenseitig bedingen. Veränderungen eines solchen Systems sind schwer zu erreichen. Heute wird allerdings die Zukunft des Verkehrs zunehmend offen und kontrovers diskutiert. Der Klimaschutz ist dabei ein wichtiger, aber keineswegs der alleinige Beweggrund. Weitere Anstöße geben die politischen und juristischen Auseinandersetzungen über die Luftqualität in den Städten sowie die Zuspitzung dieser Debatte durch den Dieselskandal. Aus Perspektive der global operierenden Automobilindustrie sind aber auch internationale Entwicklungen höchst relevant. Die Ankündigung Chinas, ab 2019 eine Quote von 10 % für Fahrzeuge mit elektrischem Antrieb einzuführen und damit Leitmarkt für Elektromobilität zu werden, ist auch für deutsche Fahrzeughersteller ein Veränderungssignal. Gleichzeitig ist absehbar, dass technologische Entwicklungen wie die Digitalisierung – insbesondere das autonome Fahren – die Mobilitätslandschaft grundlegend verändern werden. Für eine Verkehrswende ist ein gesellschaftlicher Rückhalt erforderlich, der aus einem Wertewandel bei der Mobilität erwachsen muss.

4. Vor diesem Hintergrund befasst sich dieses Gutachten damit, wie der Verkehrssektor schnellstmöglich einen wirksamen Beitrag zum Klimaschutz leisten kann, auf welche Bereiche politische Maßnahmen fokussiert werden sollten und welche ersten Schritte erforderlich sind. Hierbei setzt sich der SRU auch mit der Frage auseinander, wie ein klimagerechtes Verkehrssystem gleichzeitig rohstoffeffizient und umweltverträglich ausgestaltet werden kann, sodass auch andere ökologische Belastungsgrenzen eingehalten werden. Der Fokus des Gutachtens liegt dabei auf den Fernverkehren, die einen großen Teil der Kohlenstoffdioxidemissionen (CO_2-Emissionen) des Verkehrssektors verursachen. Mit städtischen Verkehren und der Frage einer flächen-, energie- und verkehrssparenden Siedlungs- und Raumentwicklung wird sich der SRU an anderer Stelle näher beschäftigen.

Das vorliegende Gutachten kommt zu dem Ergebnis, dass der Verkehr – insbesondere der Straßenverkehr – aus Klimaschutzgründen in weiten Teilen elektrifiziert werden muss. Eine Elektrifizierung allein ist jedoch nicht ausreichend, um neben den Treibhausgasemissionen auch Probleme wie Flächenverbrauch, Lärm und Unfallrisiken hinreichend zu verringern. Stattdessen muss sich die Organisation des Verkehrs grundlegend verändern. Zentrales Element eines klimagerechten und nachhaltigen Verkehrssystems muss eine Verringerung des motorisierten Individualverkehrs (MIV) und eine Förderung intelligenter und integrierter Mobilitätslösungen sein. Um diesen Wandel nachhaltig zu gestalten, müssen auch die für die Umstrukturierung des Verkehrssystems notwendigen Rohstoffe umwelt- und sozialgerecht bereitgestellt werden. Dafür sind Maßnahmen bei Abbau und Gewinnung der Rohstoffe sowie die hochwertige Kreislaufführung erforderlich.

5. Die letzte Bundesregierung hat sich vorgenommen, ihre Klimaschutzziele für den Verkehrssektor durch ein „Klimaschutzkonzept Straßenverkehr“ zu operationalisieren. Handlungsfelder sollten Emissionen und der Energieverbrauch von Pkw sowie leichten und schweren Nutzfahrzeugen, Infrastrukturen für eine treibhausgasneutrale Energieversorgung sowie Sektorkopplung durch Elektromobilität sein (BMUB 2016c, S. 8). Der SRU ermutigt die neue Bundesregierung, dieses Vorhaben schnellstmöglich weiter voranzutreiben. Er möchte zu den Überlegungen für ein solches Konzept beitragen, indem er auf zentrale strategische Weichenstellungen hinweist, die in der beginnenden Legislaturperiode vorgenommen werden sollten. Dabei berücksichtigt der SRU stets auch die langfristige Perspektive, die auf eine nahezu vollständige Dekarbonisierung des Verkehrssektors bis zum Jahr 2050 ausgerichtet ist.

Nachfolgend werden zunächst die klima-, umwelt- und rohstoffpolitischen Ziele erläutert, die den Rahmen für die klimaverträgliche Umgestaltung des Verkehrssystems bilden (Kap. 2). In Kapitel 3 wird knapp dargestellt, welche Anforderungen an die Verkehrswende sich aus der zunehmenden Sektorkopplung – das heißt der energiewirtschaftlichen Verknüpfung der Sektoren Strom, Wärme, Industrie und Verkehr – ergeben. Kapitel 4 analysiert den Status quo im Verkehr und stellt die aus Sicht des SRU wichtigsten Ansatzpunkte für einen klimaneutralen Verkehr dar. Kapitel 5 zeigt schließlich auf, welche konkreten politischen Weichenstellungen in der beginnenden Legislaturperiode erforderlich sind, um eine nachhaltige Verkehrswende zügig einzuleiten.

Vorabfassung - wird durch die endgültige Fassung ersetzt.

Vorabfassung - wird durch die endgültige Fassung ersetzt.

2 Anforderungen des Klima- und Umweltschutzes

Die Folgen des Klimawandels werden nicht mehr nur wissenschaftlich prognostiziert, sondern sind zunehmend real zu beobachten. Eine ungebremste Fortsetzung dieses Trends hätte dramatische Folgen für Mensch, Natur und Umwelt. Das Ziel der Bundesregierung, die Treibhausgasemissionen bis 2050 um 80 bis 95 % gegenüber 1990 zu senken, sollte aus Sicht des Sachverständigenrates für Umweltfragen (SRU) auf die Zielmarke von 95 % konkretisiert werden, damit Deutschland einen angemessenen Beitrag zum globalen Klimaschutz leistet. Da in einigen Bereichen Restemissionen nicht vermeidbar sind, müssen die Energieversorgung aller Sektoren vollständig dekarbonisiert und die CO_2-Emissionen bereits kurzfristig deutlich reduziert werden. Es ist wichtig, dabei die Wirkungen auf andere Nachhaltigkeitsziele zu berücksichtigen. Dies gilt gerade auch für den mit der Nutzung neuer Technologien einhergehenden Bedarf an Rohstoffen, deren Gewinnung und die damit verbundenen Umweltbelastungen.

2.1 Risiken des Klimawandels

6. Der Klimawandel stellt eine der größten Herausforderungen der Menschheit dar. Ein starker Anstieg des Temperaturniveaus wird weltweit erhebliche Auswirkungen haben. Dramatisch und umfassend wären die Folgen bei einem Anstieg der globalen Mitteltemperatur um 4 °C bis 2100 (World Bank 2012). Aber auch wenn es gelingt, die Erderwärmung auf 2 °C zu begrenzen, wie von der Staatengemeinschaft auf der UN-Klimakonferenz von Cancun im Jahr 2010 beschlossen (UNFCCC 2011), werden Folgen spürbar sein. Exemplarisch werden im Folgenden einige Beobachtungen und Forschungsergebnisse dargestellt.

Eine der kritischsten Konsequenzen weltweit steigender Temperaturen sind die kaum beherrschbaren Auswirkungen auf terrestrische und aquatische Ökosysteme (OSTBERG et al. 2013; HOEGH-GULDBERG und BRUNO 2010). Schon heute weisen beispielsweise Korallenriffe und die Lebensräume der Arktis deutliche Veränderungen auf. Bei einem Anstieg der Durchschnittstemperatur um 3,5 °C muss damit gerechnet werden, dass die Hälfte der globalen Landfläche einschließlich der Mehrzahl der Regenwälder, Savannen und der borealen Wälder einem Ökosystemwandel unterworfen wäre (OSTBERG et al. 2013, S. 347).

Schon heute nehmen Menschen wahr, dass die Häufigkeit, Intensität und Länge extremer Wetterereignisse wie Hitze- und Dürreperioden, Extremniederschläge und Überschwemmungen zugenommen haben. Der Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) geht davon aus, dass die Risiken durch extreme Wetterereignisse mit steigenden Temperaturen weiter zunehmen (IPCC 2014, S. 12).

Es ist zu erwarten, dass der Meeresspiegel weiter ansteigt. Bereits bei einer Erwärmung von weniger als 2 °C wird mit einem Meeresspiegelanstieg von 28 bis 56 cm gerechnet. In einem Szenario ohne Klimaschutzmaßnahmen wird sogar ein Anstieg von 57 bis 131 cm bis zum Jahr 2100 erwartet (MENGEL et al. 2016). Ein solcher Anstieg hätte existenzielle Konsequenzen für eine Reihe von Regionen der Welt, die weniger als einen Meter über dem Meeresniveau liegen, also für manche Küstenregionen sowie für tief liegende Inseln, wie beispielsweise die Malediven.

Mit steigenden Temperaturen wird in manchen Regionen auch weniger Süßwasser zur Verfügung stehen (SCHEWE et al. 2014). Ein Temperaturanstieg um 2 °C

gegenüber heute könnte dazu führen, dass der Anteil der in absoluter Wasserknappheit (< 500 m³ pro Kopf pro Jahr) lebenden Menschen um 40 % steigt (ebd.). Der Rückgang der Süßwasserverfügbarkeit hätte in einigen Regionen wiederum schwerwiegende Konsequenzen für die Pflanzenproduktion (ELLIOTT et al. 2014). Die Auswirkungen des Klimawandels haben unter anderem wegen der mangelnden Verfügbarkeit von Süßwasser in vielen Teilen der Erde einen Rückgang der Erträge der landwirtschaftlichen Nahrungsmittelproduktion zur Folge (ROSENZWEIG et al. 2014). Im Afrika südlich der Sahara kann schon eine globale Erwärmung von 1,5 °C bis 2030 dazu führen, dass 40 % der derzeitigen Maisanbaufläche für die verwendeten Sorten nicht mehr geeignet ist (World Bank 2013, S. 56). Sollte die Temperatur um mehr als 2 °C steigen, so könnten die gesamten landwirtschaftlichen Erträge in dieser Region um rund 15 bis 20 % zurückgehen (World Bank 2013), was tief greifende Folgen für die Ernährungssicherheit hätte.

Veränderungen des Klimas haben zudem direkte und indirekte Auswirkungen auf die menschliche Gesundheit. Hitzestress und die Zunahme extremer Wetterereignisse resultieren direkt in einer erhöhten Mortalität und Morbidität (IPCC 2014, S. 741 f.). Indirekte Effekte können aus der Änderung von Umwelt und Ökosystemen resultieren. Vektorübertragene (d. h. von Tieren übertragene) Krankheiten wie Malaria, Dengue-, Chikungunya- und Gelbfieber können häufiger auftreten, wenn sich das Ausbreitungsgebiet von krankheitsübertragenden Insekten ändert oder vergrößert (IPCC 2014).

7. Die fortschreitende Klimaerwärmung kann zu großskaligen und häufig unwiderruflichen Veränderungsprozessen im Erdsystem führen. Bei Übertreten eines kritischen Schwellenwertes – eines Kipppunktes – wird ein qualitativer Zustandswechsel durchlaufen. Im Erdsystem führt dies zu grundlegenden Veränderungen der Lebensgrundlagen eines Großteils der Menschheit. Beispielsweise ist belegt, dass die thermohaline Atlantikzirkulation (vereinfachend als „Golfstromsystem“ bezeichnet) schon heute an Kraft verliert, was vermutlich mit einem klimawandelbedingten Abschmelzen des Grönländischen Eisschildes in Zusammenhang steht (RAHMSTORF et al. 2015; LIU et al. 2017). Bei einer weiteren Temperaturerhöhung besteht das Risiko, dass sich diese Entwicklung verschärft. Die Atlantikzirkulation sorgt dafür, dass warme Wassermassen in den Norden transportiert werden, und bewirkt dort ein mildes Klima. Eine weitere Abschwächung dieses Umwälzsystems hätte – neben einem regionalen Anstieg des Meeresspiegels – Auswirkungen auf die Wettersysteme in Nordamerika und Europa.

8. In Europa zeigen sich die Auswirkungen des Klimawandels regional unterschiedlich und betreffen nahezu alle gesellschaftlichen Bereiche (BRASSEUR et al. 2017). Bei einem unverminderten Anstieg der globalen Treibhausgasemissionen wird auch für Deutschland erwartet, dass sich die bereits bestehenden Veränderungen des Klimasystems deutlich verschärfen (DEUTSCHLÄNDER und MÄCHEL 2017). Dies bezieht sich beispielsweise auf die steigende Anzahl von Hitzetagen (Tageshöchsttemperatur von mindestens 30 °C) und das Auftreten von Hitzewellen.

Für Deutschland wird außerdem mit einer Veränderung des Niederschlagsmusters gerechnet. Viele Regionen in Deutschland erleben bereits, dass winterliche Starkniederschläge und Hagelschlag zunehmen. Es ist zu erwarten, dass sich diese Trends bei einem unverminderten Klimawandel weiter intensivieren (KUNZ et al. 2017). Zudem wird von einem Anstieg von Hochwasserereignissen ausgegangen. Eine Studie, die die fünf größten Flüsse Deutschlands betrachtete, kam zu dem Ergebnis, dass bis Ende des Jahrhunderts mit einer Zunahme von Hochwasserschäden gerechnet werden muss (HATTERMANN et al. 2016). Das Hochwasser an der Elbe im Jahr 2013 zeigte die möglichen Ausmaße derartiger Extremereignisse.

9. Diese prognostizierten Temperatur- und Niederschlagsveränderungen bringen auch in Deutschland Risiken für die Natur und Umwelt sowie die menschliche Gesundheit mit sich. Beispielsweise zeichnen sich überwiegend negative Auswirkungen auf die Böden ab (PFEIFFER et al. 2017). Die organische Substanz sowie die Nährstoffreserven in den Böden nehmen ab. Zusammen mit wechselnder oder regional unterschiedlich auftretender Vernässung, Austrocknung und Bodenerosion führt dies zu einer abnehmenden Bodenfruchtbarkeit und gefährdet somit die Produktionsfunktion der Böden. Auch der Wald in Deutschland ist betroffen. Im Zuge des Klimawandels verändern sich die Verbreitungsgebiete von Baumarten und die Artenzusammensetzung der Wälder. Andere Niederschlagsstrukturen und längere Hitzeperioden begünstigen die Entwicklung von Schadinsekten sowie das Auftreten von Waldbränden (KÖHL et al. 2017).

Wetterbedingte Extremereignisse wie Stürme, Hochwasser, Hitzeperioden, Starkregen oder Erdrutsche haben akute Wirkungen auf den Menschen, die unmittelbar zu Verletzungen, Krankheiten oder zum Tod führen können. Darüber hinaus können mittelbar negative psychische Auswirkungen wie posttraumatische Belastungsstö-

Vorabfassung - wird durch die endgültige Fassung ersetzt.

rungen, Ängste und ähnliche Konsequenzen folgen (BUNZ und MÜCKE 2017). Die auf kommunaler Ebene unterschiedlichen, teils extremen Wetterereignisse als Folge des Klimawandels haben mitunter erhebliche Konsequenzen für die Gesundheit und das Wohlbefinden der Bevölkerung. So stellen beispielsweise sommerliche Hitzeperioden hohe Anforderungen an die Thermoregulation des menschlichen Organismus. Die Verlängerung der Pollensaison stellt eine verstärkte gesundheitliche Belastung von Allergikerinnen und Allergikern dar. Diese Konsequenzen gehen mit hohen Anforderungen an die kommunale Gesundheitsvorsorge und -versorgung einher. Sehr heiße Tage belasten besonders Personen mit Vorerkrankungen, zum Beispiel mit Herz-Kreislauf- und Atemwegserkrankungen, sowie ältere Menschen, Säuglinge und Kleinkinder (AUGUSTIN et al. 2017; GABRIEL und ENDLICHER 2011; GARCÍA-HERRERA et al. 2010; JENDRITZKY 2007; EIS et al. 2010; OUDIN ÅSTRÖM et al. 2015; XU et al. 2014a; 2014b). So verursachte die Hitzewelle 2003 in mehreren Ländern Europas zwischen 25.000 und 52.000 zusätzliche Todesfälle (KOPPE et al. 2004; LARSEN 2006). In Frankreich wurden zum Beispiel etwa 15.000 Todesfälle registriert, in Italien circa 10.000 und Deutschland hatte etwa 7.000 Todesopfer zu verzeichnen (GREWE et al. 2014; JENDRITZKY 2007; ROBINE et al. 2007). Ein Anstieg der mittleren Lufttemperatur wirkt auch negativ auf die Luftqualität, weil die atmosphärischen Durchmischungsprozesse stark verändert werden. Dies kann zu einem häufigeren Auftreten von Atemwegs-, Herz-Kreislauf- sowie Infektionserkrankungen führen, was nicht nur erhebliche Folgen für das menschliche Wohlbefinden mit sich bringt, sondern auch Kosten für das Gesundheitssystem zur Folge hat (TRÖLTZSCH et al. 2012).

10. Steigen die Temperaturen langfristig weiter an, sind die genauen Folgen nur noch schwer vorhersehbar und zunehmend unbeherrschbar. Es ist generell davon auszugehen, dass Veränderungen der großräumigen atmosphärischen und ozeanischen Zirkulationen auch in Deutschland fundamentale Folgen für das Klima, die Ökosysteme und damit auch für die Lebensverhältnisse und das Wirtschaftssystem hätten.

2.2 Klimaschutzziele

11. Wissenschaft, Politik und Gesellschaft haben die Herausforderung des Klimawandels in den letzten zwei Jahrzehnten schrittweise anerkannt und Ziele sowie Handlungsansätze auf verschiedenen Ebenen entwickelt. Maßgeblich für Deutschland sind das Klimaabkommen von Paris sowie die europäischen und nationalen Ziele.

Mit dem Klimaabkommen von Paris, auf das sich die 195 Mitgliedstaaten der Klimarahmenkonvention der Vereinten Nationen im Dezember 2015 geeinigt haben, hat sich die Weltgemeinschaft das Ziel gesetzt, die globale Erwärmung auf deutlich unter 2 °C, möglichst 1,5 °C, zu begrenzen (UNFCCC 2015). Legt man eine gerechte Verteilung des verbleibenden globalen Emissionsbudgets basierend auf einem einheitlichen Pro-Kopf-Budget zugrunde, müsste Deutschland bis zur Mitte des Jahrhunderts nahezu treibhausgasneutral wirtschaften, um einen angemessenen globalen Beitrag zum Klimaschutz zu leisten (SRU 2017, Tz. 8 und 13).

12. Die EU hat sich das Ziel gesetzt, bis 2030 die Treibhausgasemissionen um mindestens 40 % gegenüber dem Stand von 1990 zu verringern (Europäischer Rat 2014). Zudem sollen bis 2030 die Energieeffizienz (gegenüber einem Referenzszenario) um mindestens 27 % und der Anteil erneuerbarer Energien am Gesamtenergieverbrauch auf mindestens 27 % gesteigert werden. Bis 2050 sollen die Treibhausgasemissionen der EU um 80 bis 95 % gegenüber dem Stand von 1990 gesenkt werden. Nach Auffassung des SRU sollte eine Minderung von 95 % angestrebt werden, da mit einer Reduktion der Treibhausgasemissionen lediglich um 80 % die globale Erwärmung mit hoher Wahrscheinlichkeit nicht auf unter 2 °C begrenzt werden kann. Zudem sollten auch die Zwischenziele der EU als Reaktion auf das Klimaabkommen von Paris verschärft werden: Um das ambitioniertere 95 %-Ziel bis 2050 zu erreichen, müsste der Reduktionspfad ansonsten ab 2030 erheblich steiler werden (SRU 2017, Tz. 10). Überdies würde ein solcher Pfad mit hohen kumulierten Emissionen über die kommenden Jahrzehnte einhergehen (Tz. 15).

13. Für Deutschland hat die Bundesregierung 2016 einen „Klimaschutzplan 2050“ verabschiedet. Dieser orientiert sich zwar an einer weitgehenden Klimaneutralität, bleibt jedoch ohne verbindliche Festlegung hinsichtlich des konkreten Minderungsziels für 2050. Stattdessen wird ebenfalls auf die Zielspanne einer Treibhausgasminderung von 80 bis 95 % bis 2050 verwiesen. Auf dem Weg dahin strebt die Bundesregierung an, die Treibhausgasemissionen gegenüber 1990 bis 2020 um mindestens 40 %, bis 2030 um mindestens 55 % und bis 2040 um mindestens 70 % zu reduzieren. Auch hier ist der SRU der Auffassung, dass ein klares Bekenntnis zu einer 95 %-Minderung gegenüber 1990 erforderlich ist (SRU 2016b). Dies gilt umso mehr, als Deutschland als

Vorabfassung - wird durch die endgültige Fassung ersetzt.

Industriestaat und wirtschaftlich stärkstem EU-Land bei der Begrenzung der Treibhausgasemissionen eine besondere Verantwortung zukommt (BMUB 2016c, S. 2).

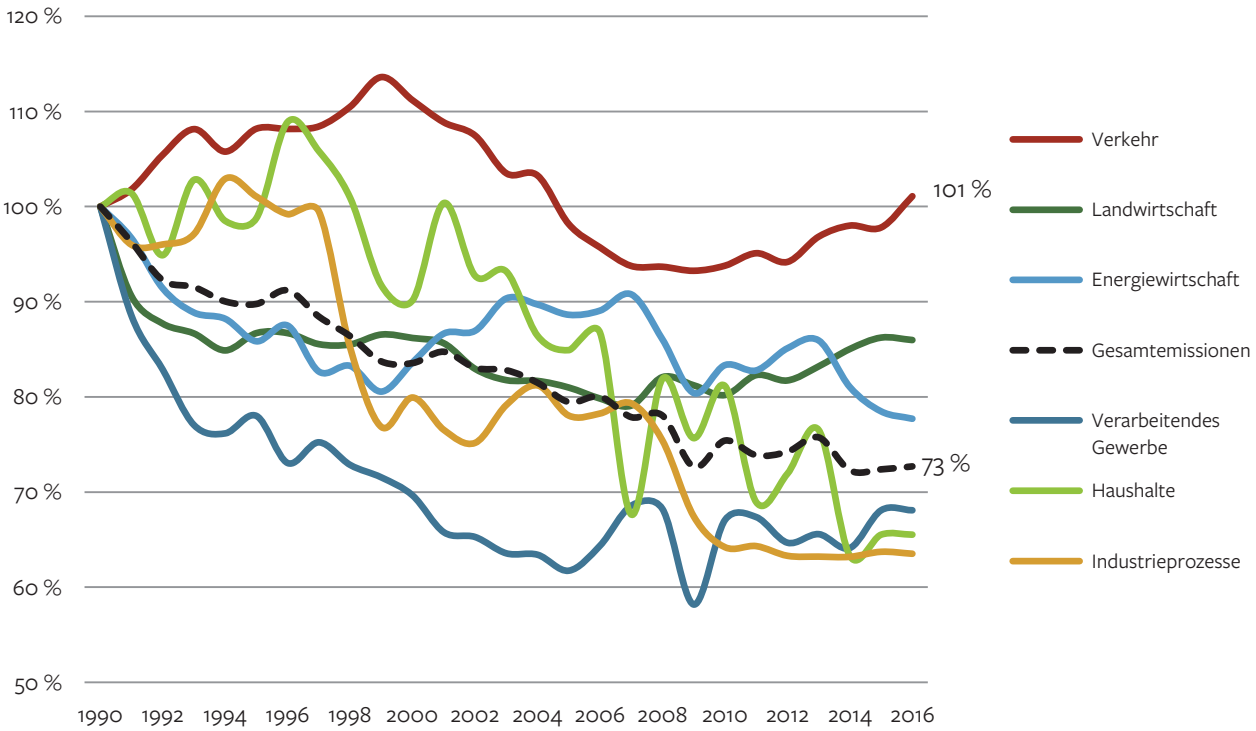
14. Um die notwendige Minderung der Treibhausgasemissionen zu erreichen, sind alle Sektoren in der Pflicht, ihre Emissionen radikal zu senken (Abb. 2-1). Durch eine langfristige, strukturierte Planung und sektorübergreifende Koordination soll der Klimaschutzplan dazu beitragen, mögliche Fehlanreize und mit den Klimazielen inkonsistente Pfadabhängigkeiten (Lock-in-Effekte) in den relevanten Sektoren zu verhindern. Die im Klimaschutzplan aufgestellten Sektorziele, deren Spezifizierung bisher nur für das Jahr 2030 erfolgt ist (Tab. 2-1), sind mithin von zentraler Bedeutung für die Ausgestaltung der Energiewende.

Da es in einigen Sektoren nicht vermeidbare Restemissionen gibt (z. B. Lachgasemissionen aus der Landwirtschaft), müssen andere langfristig vollständig dekarbonisiert werden. Dies gilt insbesondere für die Bereiche Energiewirtschaft, Gebäude und Verkehr. Diese Überlegungen sind zu berücksichtigen, wenn die Sektorziele bis zum Jahr 2018 überprüft und – in Konsequenz der Prüfung – angepasst werden sollten (BMUB 2016c, S. 3).

15. Das Gesamtminderungsziel von 55 bis 56 % bis 2030 bedeutet (ebenso wie das 2030-Minderungsziel von 40 % auf EU-Ebene), dass ab 2030 eine erhebliche Steigerung der Reduktionsrate notwendig ist, wenn eine Minderung um 95 % bis 2050 gelingen soll (SRU 2016b). Für das Ausmaß der globalen Erwärmung sind allerdings nicht in erster Linie die Emissionen im Jahr 2050 – oder zu einem bestimmten anderen Zeitpunkt – entscheidend, sondern die über die Jahre kumulierten Gesamtemissionen (ROGELJ et al. 2016). Betrachtet man diesem Budgetansatz folgend die im Zeitraum bis 2050 insgesamt auflaufenden Emissionen und nicht nur die Punktziele für die Jahre 2030 und 2050, sind die gegenwärtigen Klimaschutzziele kritisch zu hinterfragen. Diese würden – selbst bei Erreichen des 95 %-Ziels im Jahr 2050 – dazu führen, dass bis 2030 zunächst noch relativ hohe jährliche Treibhausgasemissionen zu verzeichnen sind und erst zwischen 2030 und 2050 ein drastischer Rückgang erfolgt. Dabei würde das verbleibende CO_2-Budget, das Deutschland bei einer fairen Verteilung der Klimaschutzverantwortung noch zustünde, bereits vor dem Jahr 2030 vollständig aufgebraucht (SRU 2017; BERGK et al. 2017). Um die kumulierten Emissionen Deutschlands auf dem Weg zur angestrebten (weitgehenden) Treibhausgasneutralität im Jahr 2050 deutlich zu reduzieren, muss der

Abbildung 2-1

Treibhausgasemissionen ausgewählter Sektoren in Deutschland (1990–2016)



SRU 2017; Datenquelle: UBA 2017h; 2017g

Vorabfassung - wird durch die endgültige Fassung ersetzt.

Vorabfassung - wird durch die endgültige Fassung ersetzt.

Tabelle 2-1

Sektorspezifische Emissionsminderungsziele des deutschen Klimaschutzplanes 2050

Handlungsfeld	1990 – Ist (in Mio. t CO_{2eq})	2014 – Ist (in Mio. t CO_{2eq})	2030 – Soll (in Mio. t CO_{2eq})	2030 – Soll (Minderung ggü. 1990)
Energiewirtschaft	466	358	175–183	62–61 %
Gebäude	209	119	70–72	67–66 %
Verkehr	163	160	95–98	42–40 %
Industrie	283	181	140–143	51–49 %
Landwirtschaft	88	72	58–61	34–31 %
Teilsumme	**1.209**	**890**	**538–557**	**56–54 %**
Sonstige	39	12	5	87 %
Summe	**1.248**	**902**	**543–562**	**56–55 %**

Quelle: BMUB 2016c, S. 8

jährliche CO_2-Ausstoß deshalb schneller gesenkt werden als im Klimaschutzplan 2050 angelegt. Dies gilt auch für den Treibhausgasminderungspfad der EU.

2.3 Weitere Umweltziele

16. Für eine integrative Umweltpolitik ist es nicht ausreichend, sich allein auf Klimaschutz zu fokussieren. Neben dem Klimawandel gibt es viele Umweltprobleme, die für Natur und die Gesundheit des Menschen von großer Bedeutung sind. Dazu zählen insbesondere Belastungen der Umweltmedien Wasser, Luft und Boden entlang des Lebensweges von Produkten sowie zum Beispiel der Flächenverbrauch durch Rohstoffgewinnung oder Baulandnutzung. Auch soziale Aspekte müssen in die konkrete Ausgestaltung der Politikfelder einbezogen werden. Wenn einzelne Sektoren dekarbonisiert werden, müssen dabei auch die Schnittstellen zu anderen Umweltpolitiken betrachtet werden. Im Folgenden werden besonders die bislang nicht ausreichend diskutierten Fragen des Rohstoffverbrauchs in den Blick genommen.

2.3.1 Ziele des Umwelt- und Naturschutzes

17. Im Hinblick auf Umweltschutzziele ist die Neuauflage der deutschen Nachhaltigkeitsstrategie von 2016 von besonderer Bedeutung (Bundesregierung 2017). Sie greift Handlungsfelder wie Konsum, Produktion, Ökosysteme, Gewässer und Meere auf, die in der Nachhaltigkeitsstrategie von 2002 nicht thematisiert wurden (SRU 2011a). Viele der genannten Umweltziele und Indikatoren können von den Maßnahmen im Zuge der Umsetzung der Klimaschutzziele positiv aber auch negativ beeinflusst werden. So kann sich durch Klimaschutzmaßnahmen beispielsweise die Konkurrenz um landwirtschaftliche Fläche erhöhen, unter anderem durch den vermehrten Anbau von Biomasse für die Energiegewinnung. Gleichzeitig nimmt die landwirtschaftliche Fläche seit Jahrzehnten zugunsten von Siedlungs- und Verkehrsfläche ab. In der Nachhaltigkeitsstrategie ist nunmehr verankert, dass die Flächenneuinanspruchnahme bis 2030 auf „30 ha minus x“ pro Tag gesenkt werden soll, nachdem das Ziel von 30 ha pro Tag für 2020 mit großer Wahrscheinlichkeit verfehlt werden wird. Für den Verkehrssektor sind weiterhin die Ziele der Nachhaltigkeitsstrategie, die die Emissionen der Luftschadstoffe NO_x, Feinstaub PM_{10} und $PM_{2,5}$, NH_3, NMVOC und SO_2 betreffen, von Bedeutung. Angestrebt wird eine gemittelte Reduzierung dieser Schadstoffe um 55 % gegenüber 2005 bis 2030. Im Hinblick auf Feinstaub PM_{10} ist vorgesehen, dass der Richtwert der Weltgesundheitsorganisation (World Health Organization – WHO) von 20 µg/m³ im Jahresmittel bis 2030 möglichst flächendeckend eingehalten werden soll.

Zudem können Maßnahmen des Klimaschutzes wie die Wiedervernässung von Mooren auch Ziele des Naturschutzes fördern. Das in der Nachhaltigkeitsstrategie verankerte Ziel, den Verlust der Biodiversität zu stoppen und damit eine große Vielfalt an Tieren und Pflanzen zu bewahren, ist Voraussetzung für einen leistungsfähigen Naturhaushalt und damit die Lebensgrundlage des Menschen (Tz. 30 f.).

2.3.2 Besondere Bedeutung von Rohstoffen

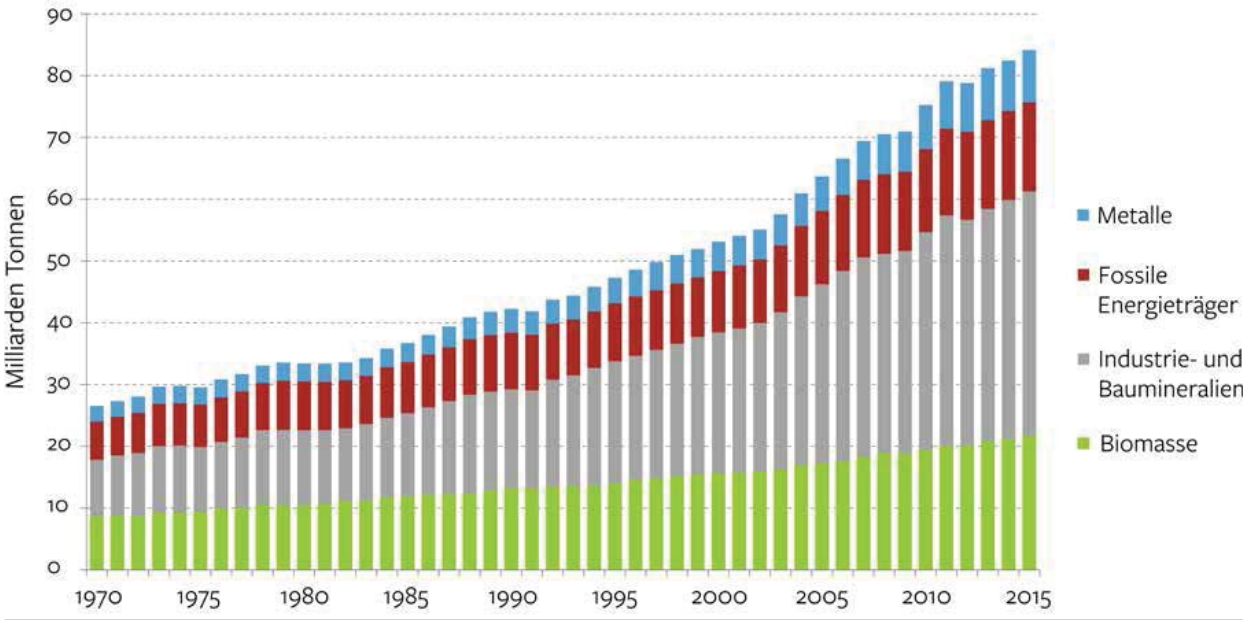
Primärrohstoffe

18. Die für die weitgehende Dekarbonisierung notwendige Einführung und der Ausbau neuer Technologien in den verschiedenen Sektoren, zum Beispiel Wind- und Photovoltaikparks, Fahrzeuge mit elektrischen Antrieben, Stromversorgungsnetze und Speichermedien, haben Auswirkungen auf den Rohstoffbedarf. Dieser wird sich dabei sowohl bezüglich der Art der Rohstoffe als auch der Mengen im Vergleich zum heutigen Bedarf ändern (VIDAL et al. 2013; BERRILL et al. 2016; ANGERER et al. 2016; GRAEDEL 2011; ZEPF et al. 2014) und vom angestrebten Klimaziel und den tatsächlich genutzten Technologien abhängen (World Bank 2017). Diese Änderungen des Rohstoffbedarfs reihen sich dabei in die seit Jahren steigende Gesamtrohstoffnachfrage ein (Abb. 2.2). Gründe für die insgesamt steigende Nachfrage sind die Zunahme der Weltbevölkerung, die wirtschaftliche Entwicklung der Schwellen- und Entwicklungsländer sowie das weiterhin hohe Wohlstands- und Konsumniveau der Industrieländer. Allerdings darf hinsichtlich der Dekarbonisierung des Verkehrs nicht vernachlässigt werden, dass durch den tief greifenden Technologiewechsel auch wesentliche bisherige Rohstoffnachfragen (Erdöl, Materialien für den Antriebsstrang von Verbrennungsmotoren, Materialien für Autoabgaskatalysatoren, Materialien für die Benzin-/Diesel-Wertschöpfungskette wie Raffineriekatalysatoren usw.) deutlich zurückgehen werden (BUCHERT 2016).

19. Viele der für Klimaschutztechnologien benötigten Rohstoffe, wie zum Beispiel Kupfer, Lithium und Seltene Erden, werden nicht in Deutschland oder der EU gewonnen (UBA 2016b). So beträgt im Fall von metallischen Rohstoffen der importierte Anteil an in Deutschland verarbeiteten Metallerzen 99,7 % (ebd., S. 25 und 32). Da während der Nutzungsphase von Klimaschutztechnologien wie Photovoltaikanlagen, Windkraftanlagen und Elektrofahrzeugen keine Emissionen von Treibhausgasen stattfinden, steigt die Bedeutung der Herstellungsphase – und hier insbesondere der Erzgewinnung und -verarbeitung zur Metallherstellung – über den Gesamtlebensweg (MICHAELIS et al. 2015; ANGERER et al. 2016). Folglich wird ein Großteil der mit dem Einsatz von Klimaschutztechnologien einhergehenden Umweltwirkungen in Drittländern und nicht in Deutschland bzw. der EU verursacht. Bei der Nutzung fossiler Energieträger wird ein Teil inländisch (insb. Braunkohle) und ein Teil im Ausland (insb. Erdöl, Erdgas) gewonnen. Die Umweltwirkungen der Gewinnung finden damit sowohl im In- als auch im Ausland statt. Der Großteil der Emissionen über den Lebensweg erfolgt aber während der Nutzungsphase – mit teils lokalen und regionalen (Luft-

Abbildung 2-2

Rohstoffabbau weltweit 1970–2015



Quelle: WU Wien 2016, überarbeitet

Vorabfassung - wird durch die endgültige Fassung ersetzt.

schadstoffe, Abfälle) und teils globalen (Treibhausgasemissionen) Auswirkungen. Verschiedene Untersuchungen zeigen, dass emissionsbedingte Umweltwirkungen alternativer Energieerzeugungstechnologien über den gesamten Lebensweg geringer sind als diejenigen fossiler Energieerzeugungstechnologien. Der Ressourcenverbrauch (Abiotic Depletion Potential – ADP) und in einigen Fällen die Landnutzung/Landnutzungsänderung sind dagegen höher (BERRILL et al. 2016; HERTWICH et al. 2015; ICMM 2012; SUH et al. 2017).

In einem Großteil der Abbauländer sind die Schritte der Erzgewinnung und -verarbeitung mit hohen Schadstoffemissionen in Boden, Wasser und Luft sowie einem hohen Flächen-, Wasser- und Energieverbrauch verbunden. Relevante Einflussfaktoren für Art und Höhe der Emissionen sind die Geologie des Vorkommens, die angewandten Gewinnungs- und Verarbeitungstechniken, die Standortbedingungen (z. B. Wasserknappheit, Unfallrisiko durch Naturereignisse) und Umweltstandards (privat und staatlich) (DEHOUST et al. 2017). Weiterhin fallen erhebliche Bergbauabfallmengen an, die teilweise toxische Eigenschaften aufweisen. Dabei wirken mit Ausnahme der Treibhausgasemissionen alle mit der Rohstoffgewinnung verbundenen Umweltbelastungen überwiegend lokal oder regional. Die Folgen sind eine Destabilisierung der Ökosysteme bis hin zu einer Vernichtung von Lebensräumen. So ist die Gewinnung von Aluminiumerzen in Brasilien beispielsweise mit einer massiven Rodung des Regenwaldes verbunden (LUTTER et al. 2013). Der Abbau von Kupfer, das in der Regel sulfidisch in Erzen gebunden ist, führt in den Abbauregionen zu sauren Grubenwässern (Acid Mine Drainage), die aus Gestein und Halden geogene Schwermetalle lösen können (DEHOUST et al. 2017). Die Weiterverarbeitung (Verhüttung) der Erze verursacht erhebliche SO_2-, Schwermetall- und Feinstaubemissionen, sofern die Abgase nicht entsprechend dem Stand der Technik behandelt werden (RÜTTINGER et al. 2014a). Im Falle von Seltenen Erden und Gold gibt es zum Beispiel Vorkommen, die radioaktives Thorium enthalten, was zu einer erhöhten Strahlenbelastung für die Minenarbeiter führt (RÜTTINGER et al. 2014b; 2015b; s. a. ausführlich zu Umweltauswirkungen der Rohstoffwirtschaft in: SRU 2012, Kap. 2.2).

Niedrige Umwelt- und schwache Sozialstandards in den Abbauregionen sowie deren ungenügende Durchsetzung führen häufig zu gravierenden gesundheitlichen und wirtschaftlichen Folgen für die regionale Bevölkerung. Dies gilt sowohl für den industriellen als auch für den Kleinbergbau. So verursacht zum Beispiel die Exposition gegenüber Quarzpartikeln (kristallinem Siliziumdioxid) bei der Kupfergewinnung ein erhöhtes Risiko für Erkrankungen wie Staublunge, chronisch obstruktive Lungenerkrankung (COPD) und Lungenkrebs (HAYUMBU et al. 2008). Zudem entstehen beispielsweise bei der Goldgewinnung im informellen Kleinbergbau erhebliche Krankheitslasten für alle Bevölkerungsgruppen. Für die Herauslösung des Goldes aus den Roherzen wird Quecksilber verwendet (sog. Amalgamierung), dessen unsachgemäßer Einsatz zu chronischen Vergiftungen führt. Folgen sind unter anderem neurologische Schäden und Störungen der fetalen Entwicklung (STECKLING et al. 2017). Gleichzeitig reichen die Löhne der Arbeiterinnen und Arbeiter oft kaum aus, um die Familien zu ernähren. So müssen häufig bereits Kinder arbeiten gehen und erhalten keine Schulbildung. Weiterhin führt der Verlust an Ökosystemleistungen oftmals dazu, dass der lokalen und regionalen Bevölkerung die Lebensgrundlagen entzogen werden. Sie verlieren zum einen Anbauflächen für die landwirtschaftliche Produktion, zum anderen erhalten sie eine Erwerbstätigkeit oftmals nur in der Erschließungsphase eines Bergbauprojektes, da in der späteren Betriebsphase eher Fachkräfte benötigt werden (ICMM 2014; van der VOET et al. 2013). Dies beschränkt in der Summe die Entwicklungsmöglichkeiten kommender Generationen.

Für ein produktions- und konsumstarkes Land wie Deutschland – und auch für die EU – ergibt sich eine Verantwortung für die in diesen Ländern durch die Rohstoffnachfrage verursachten Auswirkungen (Bundesregierung 2017; BMUB 2016a; UBA 2016b).

20. Bezüglich der nachgefragten Rohstoffe ist in den nächsten Jahrzehnten mit einer Erschöpfung der verfügbaren Vorkommen nicht zu rechnen (BGR o. J.-a; o. J.-b; BUNGE und STÄUBLI 2014; ANGERER et al. 2016; FRONDEL et al. 2006). Jedoch führen verschiedene Faktoren dazu, dass es zunehmend wirtschaftlich ist, auch Lagerstätten mit geringen Rohstoffkonzentrationen bzw. in tieferer Lage zu erschließen (neben der steigenden Rohstoffnachfrage und Weiterentwicklung der Gewinnungstechnologien wird der Abbau niedrigkonzentrierter Erze durch die Realisierung sehr großer Tagebaue attraktiv) (ANGERER et al. 2016; DEHOUST et al. 2017). Für die Gewinnung dieser Rohstoffe ist in der Regel ein höherer Energieaufwand notwendig, was wiederum mit höheren Treibhausgasemissionen verbunden ist. Mit Blick auf die ökologische Gesamtbilanz von Produkten und die Bedeutung des Bergbaus für die globalen Treibhausgasemissionen (ca. 2 %) sind Strategien zur Reduzierung notwendig (ICMM 2012). Ziel sollte sein, neben

Vorabfassung - wird durch die endgültige Fassung ersetzt.

der Einführung von Effizienzmaßnahmen die für den Rohstoffabbau notwendige Energie regenerativ zu erzeugen. Weiterhin kann der Abbau niedrigkonzentrierterer bzw. tiefer liegender Erzvorkommen zu einem höheren Wasser- und Flächenverbrauch und höheren Mengen an Bergbauabfällen (Tailings, Abraum) führen (DEHOUST et al. 2017). Dies trifft auch ökologisch sehr sensible Regionen wie den Regenwald, ebenso wie die Arktis oder die Tiefsee, in denen derzeit Rohstoffvorkommen erforscht werden. Daraus folgt, dass die Nutzung der Rohstoffe nicht durch eine Endlichkeit der Vorkommen begrenzt ist, aber die lokalen und regionalen Belastungsgrenzen häufig aufgrund der durch Gewinnung und Verarbeitung verursachten Umweltwirkungen überschritten werden (BUNGE und STÄUBLI 2014; CHAHOUD et al. 1999; ERICSSON und SÖDERHOLM 2010; MUDD und WARD 2008).

Das Ziel, aus Umweltschutzgründen eine treibhausgasneutrale Wirtschafts- und Lebensweise in Deutschland zu etablieren, ist nur mit Nutzung von insbesondere im Ausland gewonnenen metallischen Rohstoffen möglich. Dies darf nicht mit negativen Umwelt-, Gesundheits- und Sozialauswirkungen in den Abbauländern „eingekauft" werden, auch wenn dadurch die Preise für Rohstoffe steigen können (ANGERER et al. 2016). Diese Anforderung hätte im Übrigen auch bereits seit Jahrzehnten für die Gewinnung fossiler und nuklearer Brennstoffe gelten müssen.

Hinsichtlich der Verfügbarkeit ist zu ergänzen, dass sich Versorgungsengpässe allerdings trotzdem – zumindest temporär – ergeben können. Die Gründe für solche Engpässe sind vielfältig – sie können unter anderem durch kurzfristige Nachfragesteigerungen verursacht werden oder in der politischen Instabilität von Förderländern begründet sein. Weiterhin ist es insbesondere bei Koppelprodukten in der Regel trotz einer Erhöhung der Nachfrage nicht wirtschaftlich, die Förderung zu erhöhen (zu möglichen Engpässen und Rohstoffkonkurrenzen s. a. Tz. 63 ff.).

Sekundärrohstoffe

21. Um den Druck auf die Primärrohstoffe und die mit ihrer Gewinnung verbundenen Umweltfolgen zu verringern, gibt es entlang des Lebensweges von Produkten verschiedene Ansatzpunkte. So können Effizienzsteigerungen in der Produktion zu Materialeinsparungen führen oder stark umweltbelastende Rohstoffe durch weniger belastende ersetzt werden. Eine große Rolle spielen weiterhin Konsummuster und insbesondere die Nutzungsdauer von Produkten. Von hoher Bedeutung ist, dass die Produkte an ihrem Lebensende qualitativ hochwertig rezykliert werden (s. Tz. 272 ff.), und somit der Rohstoffbedarf für neue Produkte langfristig immer stärker aus dem anthropogenen Lager gespeist werden kann. Unter anthropogenem Lager wird der Materialbestand der von Menschen angelegten bzw. geschaffenen Infrastrukturen, Gebäude und Güter des täglichen Konsums verstanden (UBA 2017j). Die Kreislaufführung von Rohstoffen ist dabei kein Selbstzweck, sondern soll über den gesamten Lebenszyklus zur Verringerung der Umweltbelastungen im Vergleich zur Primärrohstoffnutzung führen und die Bedürfnisbefriedigung künftiger Generationen sicherstellen. Dass die Sekundärrohstoffgewinnung mit geringeren Energiebedarfen und Umweltwirkungen verbunden ist, trifft auf viele Materialien/Stoffe zu, jedoch nicht auf alle (z. B. bei schwierig lösbaren Verbunden oder stark heterogenen Materialmixen) (REUTER et al. 2013). Wird der Aufwand der Primärgewinnung größer (z. B. aufgrund zurückgehender Metallkonzentrationen im Erz), steigt jedoch der energetisch/ökologisch optimale Recyclinganteil (ANGERER et al. 2016). Insgesamt nimmt die Materialdiversität und -komplexität sowie der Einsatz von sehr geringen Mengen einzelner Stoffe zu (CIACCI et al. 2015; RELLER et al. 2009; RELLER 2016). Dies führt zu hohen Aufwänden im Recyclingprozess und zu dissipativen Verlusten der Stoffe/Materialien (ebd.). Um diese Effekte berücksichtigen zu können, ist eine hohe Transparenz bezüglich der eingesetzten Stoffe und Materialien sowie eine frühzeitige „Mitplanung" der Abfallphase von Produkten wichtig.

Gründe, warum der Bedarf für einige Rohstoffe nicht durch Sekundärrohstoffe gedeckt werden kann, sind nachfolgend genannt:

- Bisher wurden nur wenige Produkte, die diese Stoffe/Materialien beinhalten, zu Abfall (geringe Mengen und/oder geringe Konzentrationen in den Abfallströmen).
- Die wertstoffhaltigen Abfälle gelangen nicht in die Aufbereitung (Defizite der Sammlung).
- Es gibt bislang keine Recyclingtechnologie, die im industriellen Maßstab eingesetzt werden kann.
- Es gibt eine Recyclingtechnologie, aber diese ist unter derzeitigen Marktbedingungen (Niveau der Rohstoffpreise usw.) nicht wirtschaftlich.

22. Um gute Voraussetzungen für die Etablierung eines hochwertigen Recyclings zu schaffen, ist es wichtig, be-

Vorabfassung - wird durch die endgültige Fassung ersetzt.

reits bei der Technologieentwicklung die Verwertbarkeit zu berücksichtigen. So sollten möglichst nur solche Stoffe und Materialien eingesetzt werden, die hochwertig rezyklierbar sind. Bei Materialverbünden ist darauf zu achten, dass die einzelnen Materialien wieder voneinander getrennt werden können. Weiterhin ist es notwendig, dass geeignete Erfassungsstrukturen sowie Behandlungs- und Rückgewinnungsanlagen existieren, sobald die ersten Produkte zu Abfall werden. Sofern dies unter den derzeitigen Rahmenbedingungen nicht aus einem ökonomischen Interesse heraus geschieht, oder bestehende Strukturen nicht hinreichend effektiv arbeiten, sind möglicherweise staatliche Anreize, Unterstützungen, regulatorische Ansätze oder auch der Abbau von Fehlanreizen notwendig.

Auch für Klimaschutztechnologien ist es notwendig, Aspekte der Abfallphase bereits bei der Produktentwicklung zu berücksichtigen. Diese Betrachtungen sind umso wichtiger, als dass innerhalb relativ kurzer Zeit ein hoher Ausstattungsgrad mit diesen Technologien erreicht werden wird. Aufgrund der langen Nutzungsdauer und der hohen Materialbindung ist damit festgelegt, welche Möglichkeiten der Kreislaufführung und damit Gewinnung von Sekundärrohstoffen in den nächsten Jahrzehnten bestehen werden.

2.3.3 Rohstoff- und Ressourcenschonungsziele

23. In den letzten zwei Dekaden wurden auf europäischer Ebene verschiedene Strategien und Leitinitiativen im Hinblick auf die nachhaltige Nutzung natürlicher Ressourcen sowie die Sicherung der Rohstoffversorgung Europas entwickelt. Hierzu zählt insbesondere die „Thematische Strategie für eine nachhaltige Nutzung natürlicher Ressourcen“ (Europäische Kommission 2005), die im Jahr 2011 durch die Leitinitiative „Ressourcenschonendes Europa“ und den „Fahrplan für ein ressourcenschonendes Europa“ weiterentwickelt wurde. Übergreifendes Ziel dieser Strategien und Initiativen ist die Verringerung der mit der Ressourcennutzung verbundenen Umweltwirkungen. Die langfristige Vision des „Fahrplans für ein ressourcenschonendes Europa“ ist, dass die Wirtschaft der EU bis 2050 so arbeitet, dass die Ressourcenknappheit und die Grenzen des Planeten ernst nimmt und die natürlichen Ressourcen nachhaltig bewirtschaftet werden. Die Leitinitiative soll außerdem strategische Programme in den Bereichen Klimaschutz, Energie, Verkehr, Industrie, Rohstoffe, Landwirtschaft, Fischerei, Biodiversität und regionale Entwicklung unterstützen.

24. Parallel zu den Strategien und Initiativen rund um die nachhaltige Nutzung natürlicher Ressourcen wurde 2008 „Die Rohstoffinitiative – Sicherung der Versorgung Europas mit den für Wachstum und Beschäftigung notwendigen Gütern“ veröffentlicht (Europäische Kommission 2008). Das Ziel der Rohstoffinitiative ist in erster Linie die sichere Versorgung der europäischen Wirtschaft mit Rohstoffen sowohl aus dem In- als auch Ausland sowie die Stärkung von Ressourceneffizienz und Bereitstellung von Sekundärrohstoffen. Ausgehend von dieser Initiative wurden in den Jahren 2010, 2014 und 2017 Listen mit sogenannten kritischen Rohstoffen veröffentlicht (Europäische Kommission 2011b; 2014a; 2017b). Bewertungskriterien für die Einstufung als „kritisch“ sind die wirtschaftliche Bedeutung eines Rohstoffs innerhalb der europäischen Wirtschaft und das Versorgungsrisiko. Gemessen wird dies anhand einer „Importabhängigkeitsquote“, einem „Ersetzbarkeitsindex“ und einer „End-of-Life-Recycling-Einsatzquote“ (Europäische Kommission 2017b). Damit spielen Umweltaspekte nur eine untergeordnete Rolle für die Erstellung der EU-Liste kritischer Rohstoffe. Die Arbeiten rund um die Rohstoffinitiative werden außerdem von einer Reihe Aktivitäten ergänzt, wie der „European Innovation Partnership on Raw Materials“, die verschiedene Stakeholder mit dem Ziel zusammenbringt, eine nachhaltige Rohstoffversorgung zu unterstützen. Weitere Initiativen sind das „Raw Materials Scoreboard“ (Europäische Kommission – Generaldirektion Binnenmarkt, Industrie, Unternehmertum und KMU 2016) und das „Raw Materials Information System“ (Europäische Kommission 2014b), die verlässliche Daten zu Primär- und Sekundärrohstoffen für Politik und Wirtschaft bereitstellen.

25. Auf nationaler Ebene wurden im Jahr 2007 zunächst die „Elemente einer Rohstoffstrategie der Bundesregierung“ veröffentlicht (Bundesregierung 2007). Diese wurden im Jahr 2010 durch die „Rohstoffstrategie der Bundesregierung“ abgelöst (BMWi 2010). Schwerpunkt dieser Strategie sind Maßnahmen zur Bekämpfung von Handelshemmnissen (z. B. durch die Gewährung von sog. Ungebundenen Finanzkrediten) und zur Diversifizierung von Rohstoffbezugsquellen (z. B. durch geologische Erkundungen). Die Strategie thematisiert auch die Rolle der Entwicklungszusammenarbeit für den Rohstoffsektor sowie das Instrument bilateraler Rohstoffpartnerschaften und das Engagement Deutschlands in der europäischen und internationalen Rohstoffpolitik. Weiterhin beinhaltet sie auch die Aspekte Materialeffizienz und Recycling und verweist auf die Erarbeitung des nationalen Ressourceneffizienzprogramms ProgRess.

Vorabfassung - wird durch die endgültige Fassung ersetzt.

Mit Blick auf eine nachhaltige Entwicklung im Rohstoffsektor sowohl in Entwicklungs- und Schwellen- als auch Industrieländern wurde außerdem das „Entwicklungspolitische Strategiepapier Extraktive Rohstoffe“ erarbeitet (BMZ 2011). Zudem existieren eine Reihe von Projekten insbesondere des Bundesministeriums für wirtschaftliche Zusammenarbeit und Entwicklung (BMZ) und der Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR), um beispielsweise den Stand der Technik, finanzielle Transparenz und Transparenz in Rohstofflieferketten zu implementieren.

26. Ausgehend von der „Thematischen Strategie für eine nachhaltige Nutzung natürlicher Ressourcen“ hat die Bundesregierung im Jahr 2012 erstmals ein „Deutsches Ressourceneffizienzprogramm“ (ProgRess) veröffentlicht (BMU 2012). ProgRess zielt auf die Betrachtung des gesamten Lebenszyklus von Produkten und bezieht somit die nachhaltige Versorgung mit Rohstoffen, die Effizienz in der Produktion, das Konsumverhalten und die Abfallphase ein. Im Jahr 2016 wurde das Programm aktualisiert (ProgRess II) (BMUB 2016b). Betont wird darin die Verantwortung gegenüber den Förderländern, diese bei der friedlichen, sozial- und naturverträglichen Gewinnung vor Ort zu unterstützen. ProgRess II thematisiert außerdem die integrierte Betrachtung von Material- und Energiestoffflüssen, wobei der Fokus auf Synergien im Rahmen der Güterproduktion liegt. Weitere Schwerpunkte sind die nachhaltige urbane Entwicklung sowie nachhaltiges Bauen.

Die drei beschriebenen Strategien von BMWi, BMZ und BMUB existieren nebeneinander, wobei durchaus gemeinsame Ziele, wie Transparenz im Rohstoffsektor und Verbesserung der Staats- und Unternehmensführung, aber auch unterschiedliche Zielstellungen und Priorisierungen existieren. Zudem sind unterschiedliche Instrumente vorgesehen, um die Ziele zu erreichen (GANDENBERGER et al. 2017).

27. Ein Abgleich des deutschen Klimaschutzplans 2050 mit ProgRess II zeigt, dass viele Anknüpfungspunkte zwischen beiden Strategien bestehen, aber zum Beispiel die Potenziale von Materialeinsparung und Sekundärrohstoffnutzung im Bereich des Klimaschutzes nicht explizit angesprochen und integriert sind (GRAAF und JAKOB 2016). Demnach sollte der Klimaschutzplan, der auf den inländischen Energieverbrauch fokussiert, um die mit inländischem Konsum und Produktion verbundenen, aber im Ausland stattfindenden Energieaufwände entlang des Lebenszyklus erweitert werden. Dadurch würden die Energieaufwände der Rohstoffgewinnung im Ausland berücksichtigt. ProgRess könnte in seiner Weiterentwicklung (ProgRess III, Veröffentlichung voraussichtlich 2020) wiederum die Sektorziele des Klimaschutzplans auf ihre Rohstoffauswirkungen hin untersuchen, zum Beispiel mit Blick auf den schonenden Abbau der für die Stromversorgung und Elektromobilität benötigten Rohstoffe.

28. Rohstoff- bzw. Ressourcenschonungsaspekte werden auch im Rahmen des Integrierten Umweltprogramms 2030 (IUP 2030) des Umweltministeriums thematisiert (BMUB 2016a). Das Programm fasst zusammen, dass der Ressourceneinsatz der deutschen Wirtschaft nach wie vor zu hoch ist. Es wird gefordert, dass die Rohstoffnutzung die ökologischen Belastungsgrenzen in Deutschland und weltweit einhalten muss und die vom hiesigen Konsum ausgehenden weltweiten Umweltauswirkungen schrittweise auf ein global verträgliches Maß vermindert werden sollen. Das Programm, das insgesamt sehr breit aufgestellt ist und zahlreiche Umweltpolitikfelder adressiert, greift auch das Ziel des Umbaus des Verkehrs auf. Dabei werden Synergieeffekte der Elektromobilität mit der Verbesserung der Luftqualität und der Verringerung von Lärmemissionen aufgegriffen – nicht jedoch Wechselwirkungen mit dem Ziel der Verringerung des Rohstoffverbrauchs und der damit verursachten Umweltwirkungen.

Die Strategien und Programme sowohl auf europäischer als auch nationaler Ebene adressieren in unterschiedlichen Ausprägungen die verschiedenen Stufen des Lebenszyklus von Rohstoffen, wobei sowohl wirtschaftlich motivierte Hintergründe als auch umwelt-, gesundheits- und sozialpolitische Ziele Beweggründe für Aktivitäten sind. Um in die tatsächliche Umsetzung zu kommen, müssen die verschiedenen skizzierten Maßnahmen jedoch zukünftig konkretisiert sowie verbindlich vorgeschrieben werden. Dazu sollten zum Beispiel die Instrumente der Außenwirtschaftsförderung verbindlich an die Einhaltung von Umwelt- und Sozialstandards geknüpft werden.

2.3.4 Kreislaufwirtschaftsziele

29. Mit Bezug auf die Weiterentwicklung der Abfall- zu einer Kreislaufwirtschaft hat die Europäische Kommission im Jahr 2015 das „Kreislaufwirtschaftspaket“ (Europäische Kommission 2015) veröffentlicht. Neben einem Legislativpaket, welches Änderungen der bestehenden abfallwirtschaftlichen Regulierungen beinhaltet, enthält dieses Kreislaufwirtschaftspaket auch einen Ak-

Vorabfassung - wird durch die endgültige Fassung ersetzt.

tionsplan. Dieser zielt auf die gesamte Wertschöpfungskette, das heißt die Produktgestaltung, die Produktionsprozesse und die Abfallbewirtschaftung. Neben allgemeinen Ansätzen fokussiert der Aktionsplan auf eine Reihe von Schwerpunktbereichen, darunter sogenannte kritische Rohstoffe. Eine direkte nationale Umsetzung des EU-Kreislaufwirtschaftspaketes gibt es in Deutschland nicht. Viele der darin thematisierten Aspekte werden aber in der kontinuierlichen Weiterentwicklung der Abfallgesetzgebung und ProgRess II bereits aufgegriffen.

Im IUP 2030 (BMUB 2016a) wird für das Jahr 2050 die Vision entworfen, dass der Wohlstand und der gute Zustand der Umwelt das Ergebnis einer innovativen Kreislaufwirtschaft sind, bei der nichts vergeudet wird, natürliche Ressourcen nachhaltig bewirtschaftet werden und die Biodiversität geschützt, geachtet und wiederhergestellt wird. Dabei wird im Programm darauf verwiesen, dass in Deutschland ein wertvolles anthropogenes Lager heranwächst, das als Rohstoffquelle genutzt werden kann.

Ebenso wie im Bereich der Rohstoffpolitik und Ressourcenschonung müssen zur Etablierung einer Kreislaufwirtschaft die Programme und Strategien stärker mit konkreten und verbindlichen Maßnahmen unterlegt werden. Dabei ist es auch wichtig, noch einmal die Ziele zu diskutieren und insbesondere qualitative Anforderungen an die Kreislaufführung von Rohstoffen zu stellen. Um Zielkonflikte zwischen Materialeffizienz und Kreislauffähigkeit erkennen zu können, sollten außerdem materialeffiziente Werkstoffe und Produkte, die durch diese Eigenschaft Rohstoffe einsparen, immer auch auf ihre Kreislauffähigkeit geprüft werden. Nur so kann eine ganzheitliche Material- und Produktentwicklung gewährleistet werden.

2.4 Synergien und Zielkonflikte der Klimaschutzziele mit anderen Umweltzielen

30. Die weitgehende Dekarbonisierung der Energieversorgung führt zu einer technologischen Neuausrichtung – insbesondere in den Sektoren Energieerzeugung und Verkehr (VIDAL et al. 2013; BERRILL et al. 2016; ANGERER et al. 2016; GRAEDEL 2011; ZEPF et al. 2014; World Bank 2017), aber auch im Gebäudebereich und der Industrie. Durch die Vielzahl unterschiedlicher Umweltwirkungen und Ziele in der Klima-, Umwelt- und Energiepolitik steigt das Risiko von Widersprüchen und Konflikten zwischen Handlungsfeldern und auch Handlungsebenen (WOLFF et al. 2016, S. 15). Deshalb können zwischen dem Klimaschutz auf der einen und dem Umwelt- sowie Naturschutz auf der anderen Seite Synergien, aber auch Zielkonflikte entstehen.

Einige ausgewählte Zusammenhänge zwischen der Umsetzung der Klimaziele mittels Klimaschutztechnologien und anderen Umweltaspekten sind in Abbildung 2-3 dargestellt. Bei der Weiterentwicklung der Klimapolitik sowie ihrer Unterlegung mit konkreten Zielen und Maßnahmen ist es deshalb wichtig zu beachten, welche Auswirkungen sich auf andere Ziele des Umweltschutzes ergeben und ob gegebenenfalls korrektive Maßnahmen notwendig sind.

Synergien

31. Es gibt eine Reihe von Synergien zwischen Klima-, Umwelt- und Naturschutzzielen. Naturschutzmaßnahmen wie Moorschutz und Wiedervernässung von Feuchtlebensräumen, Fließgewässerrenaturierungen, naturnahe Waldbewirtschaftung und Biotopverbundsysteme können wichtige Beiträge zum Klimaschutz und zur Klimafolgenanpassung leisten, da sie zum Beispiel die Senkenleistung fördern und Überschwemmungsflächen bei Hochwasser bieten. Gleichzeitig werden Habitate teils seltener Arten wiederhergestellt und Lebensräume miteinander verbunden.

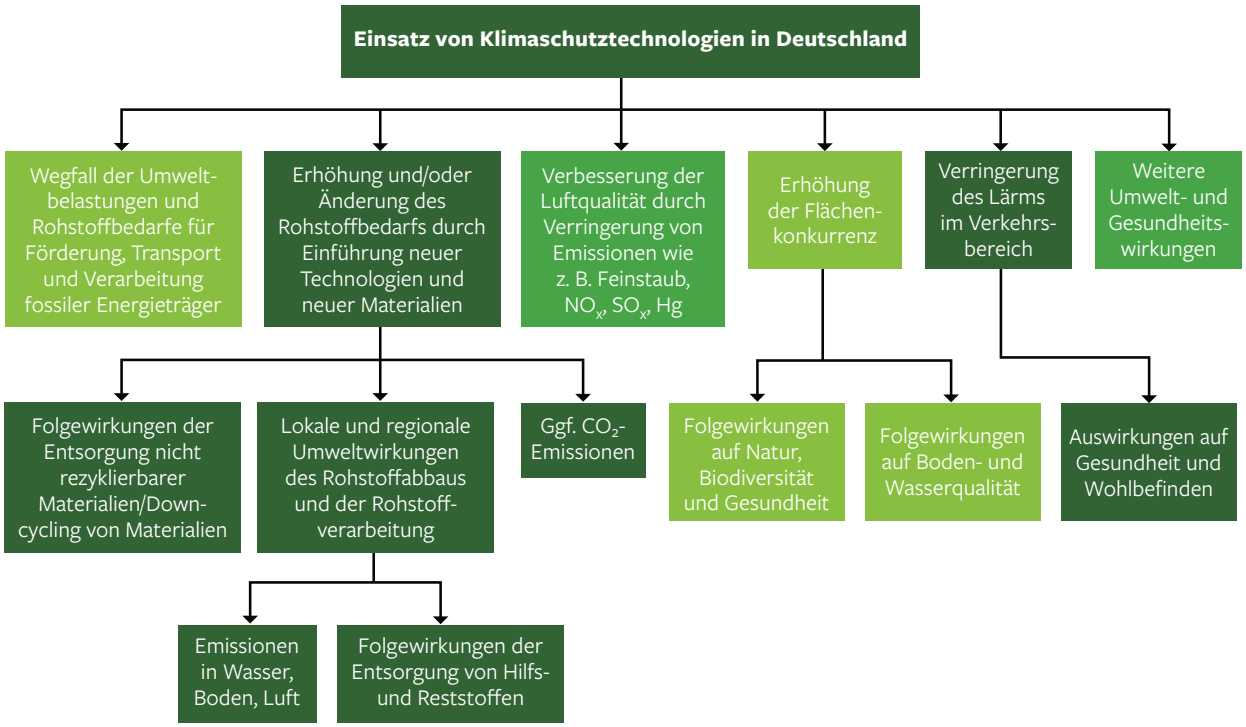
Durch die Technologiewechsel der Dekarbonisierung verringern sich insbesondere die negativen Umweltwirkungen der Erdöl-, Erdgas- und Kohlegewinnung erheblich. Die Umstellung der Stromproduktion auf regenerative Energien vermindert neben den CO_2-Emissionen auch andere Emissionen, unter anderem von Feinstaub, Quecksilber und NO_x (ausführlich: SRU 2017). Damit einher geht eine Verringerung der Umweltauswirkungen auf Boden, Wasser und Luft, was sich wiederum positiv auf die Biodiversität sowie die menschliche Gesundheit auswirkt.

Durch den Einsatz von Elektrofahrzeugen statt Fahrzeugen mit Verbrennungsmotor ist – bezogen auf die Emissionen des Motors – eine direkte Verbesserung der Luftqualität zu erwarten, weil unter anderem die Emissionen von Feinstaub und NO_x abnehmen. Dies ist mit positiven Effekten für die Gesundheit der Menschen, insbesondere der Stadtbevölkerung, verbunden. Wird gleichzeitig die Verkehrsleistung verringert, gehen zudem die Belastungen der Luft und der Gewässer durch Reifenabrieb (UBA 2009) sowie durch Lärm, der durch den Reifen-Fahrbahn-Kontakt erzeugt wird, zurück (UBA 2013).

Vorabfassung - wird durch die endgültige Fassung ersetzt.

Abbildung 2-3

Potenzielle Umwelt- und Gesundheitsauswirkungen des Einsatzes von Klimaschutztechnologien



SRU 2017

Zielkonflikte

32. Es können aber auch Zielkonflikte zwischen Klimaschutz und anderen Umweltzielen auftreten. So lassen sich zum Beispiel die Ziele des Naturschutzes einerseits nicht ohne einen wirksamen Klimaschutz erreichen, da der Klimawandel bereits heute viele Ökosysteme und Arten gefährdet (s. Kap. 2.1). Andererseits können Klimaschutzmaßnahmen – insbesondere der Ausbau und die Nutzung erneuerbarer Energien – auch negative Auswirkungen auf Natur und Landschaft haben. Bei der Nutzung von Wasser- und Windkraft zur Stromerzeugung oder von Pumpspeicherkraftwerken können Zielkonflikte mit dem Artenschutz oder dem Schutz von Gewässern auftreten. Der Ausbau von Windkraftanlagen kann die Lebensräume bestimmter Arten beeinträchtigen, beispielsweise durch das Kollisionsrisiko mit Vögeln und Fledermäusen. Die Offshore-Windkraft erhöht zudem die Lärmbelastung für Schweinswale.

Würde als einer der zukünftigen Energieträger in relevanten Mengen Biomasse eingesetzt, die dafür eigens angebaut wird, würde dies zu einer Erhöhung der Flächenkonkurrenz führen. Sofern die Biomasse in intensiver Landwirtschaft gewonnen wird, können Folgewirkungen für Böden (z. B. Erosion, Auslaugung) und Gewässer (z. B. Eintrag von Phosphor und Nitrat aus Düngemitteln) auftreten. Dies wiederum wirkt sich negativ auf die Biodiversität aus und kann außerdem über das Trinkwasser die menschliche Gesundheit beeinträchtigen (s. ausführlich SRU 2015b).

Für den Bau der Erzeugungsanlagen und batterieelektrische Fahrzeuge werden erhebliche Mengen an Rohstoffen benötigt, deren Gewinnung und Verarbeitung in den Abbauländern hohe Umweltbelastungen verursachen können (s. Tz. 19).

2.5 Zwischenfazit

33. Um einen Klimawandel mit einem Temperaturanstieg oberhalb von 2 °C und seine dramatischen Folgen für Natur, Umwelt und menschliche Gesundheit zu vermeiden, ist langfristig eine weitestgehend treibhausgasneutrale Wirtschaftsweise erforderlich. Die im Klimaschutzplan 2050 verankerten Ziele sollten aus Sicht des

Vorabfassung - wird durch die endgültige Fassung ersetzt.

SRU unmissverständlich an einer Minderung der Treibhausgasemissionen um 95 % ausgerichtet werden (SRU 2016b). Da in einigen Bereichen (z. B. Lachgasemissionen aus der Landwirtschaft) Restemissionen nicht vermeidbar sind, müssen andere Sektoren, wie beispielsweise der Verkehrssektor, vollständig dekarbonisiert werden. Während in der Stromversorgung diese Umstellung bereits begonnen hat, steht dies bisher im Verkehrssektor noch aus. Mit dieser Transformation muss unverzüglich begonnen werden. Nur so kann erreicht werden, dass die über die Zeit kumulierten Emissionen an Treibhausgasen nicht das Deutschland bei gerechter Lastenverteilung zustehende Budget überschreiten.

Angesichts der anstehenden intensiven Marktdurchdringung neuer Technologien und deren relativ langer durchschnittlicher Nutzungsdauer stehen in naher Zukunft wichtige Pfadentscheidungen an. Hierbei ist es von zentraler Bedeutung, dass diese Entscheidungen mit den langfristigen Klimazielen im Einklang stehen, um teure Lock-ins (schwer umkehrbare Pfadentscheidungen) und sunk investments (verlorene Investitionen) zu vermeiden.

34. Bei den anstehenden Richtungsentscheidungen müssen neben der Minderung des Treibhausgasausstoßes stets auch die Wirkungen auf andere Nachhaltigkeitsziele berücksichtigt werden. Dies gilt aufgrund der damit verbundenen Umweltwirkungen insbesondere für die Bereitstellung der notwendigen Rohstoffe inklusive der qualitativ hochwertigen Rezyklierbarkeit am Ende der Nutzungsdauer. Der Bedarf an Rohstoffen für Klimaschutztechnologien wird in den nächsten Jahren und Jahrzehnten für einige Rohstoffe voraussichtlich kurz- und mittelfristige Peaks in der Nachfrage auslösen. Da einige der benötigten Rohstoffe (z. B. das Seltenerdmetall Dysprosium) bisher nur in geringen Mengen verwendet wurden, werden hierfür auf absehbare Zeit keine größeren Ströme an Sekundärrohstoffen zur Verfügung stehen. Für diese Rohstoffe gibt es in der Regel keine Lagerstätten in Deutschland oder Europa, sodass sie in Drittländern gefördert werden. Damit werden die mit der Gewinnung verbundenen Umweltbelastungen in diese Regionen „exportiert". Jene Länder, die diese Rohstoffe nachfragen, sollten Mitverantwortung für deren möglichst umwelt- und sozialgerechte Gewinnung übernehmen.

Vorabfassung - wird durch die endgültige Fassung ersetzt.

Vorabfassung - wird durch die endgültige Fassung ersetzt.

Vorabfassung - wird durch die endgültige Fassung ersetzt.

3

Der Verkehrssektor in einem dekarbonisierten Energiesystem

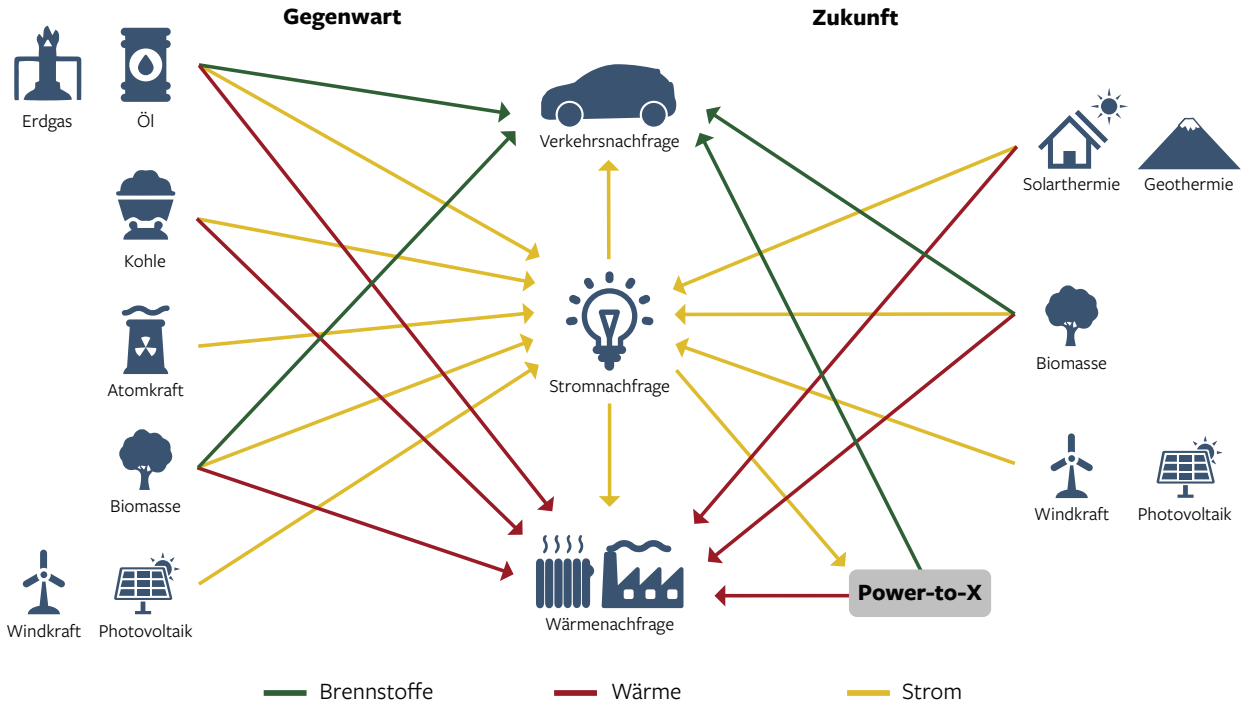
Erneuerbarer Strom wird zukünftig in allen Verbrauchssektoren eine bedeutende Rolle in der Energieversorgung übernehmen. Wie der Verkehrssektor sinnvoll in ein klimaneutrales Energiesystem integriert werden kann, hängt auch von Pfadentscheidungen in anderen Sektoren ab. Angesichts der Flächenkonkurrenz und einer erheblichen Rohstoffinanspruchnahme ist der Verbrauch erneuerbaren Stroms möglichst gering zu halten. Zugleich muss der Verbrauch flexibilisiert und dem Angebot aus fluktuierenden Quellen angepasst werden. Hinsichtlich der Nutzung knapper Biomassepotenziale sowie synthetischer strombasierter Energieträger tritt der Verkehrssektor mit der Industrie und auch dem Gebäudesektor in Konkurrenz. Die in diesem Kapitel vorgestellten systemischen Analysen machen deutlich, dass der Verkehr der Dekarbonisierung des Energiesystems am besten dient, wenn sein Primärenergieverbrauch durch eine weitgehende direkte Elektrifizierung möglichst gering gehalten wird.

35. Der Stromsektor weist im Vergleich zu anderen Sektoren ein hohes, relativ kurzfristig und zu geringen Kosten erschließbares Potenzial zur Verringerung von Treibhausgasemissionen auf (Europäische Kommission 2011a, S. 5). Es ist daher vergleichsweise effizient, fossile Energieträger in verschiedenen Verbrauchssektoren zu erheblichen Teilen durch erneuerbaren Strom zu substituieren. Eine Elektrifizierung des Gebäude-, Verkehrs- sowie Industriesektors kann direkt oder indirekt über strombasierte Sekundärprodukte (z. B. Wasserstoff) erfolgen. Durch die Herstellung und Nutzung solcher Sekundärprodukte können grundsätzlich auch nicht direkt elektrifizierbare Prozesse dekarbonisiert werden. Im Gebäudewärmebereich bieten überdies Geothermie und Solarthermie substanzielle Potenziale für die Nutzung erneuerbarer Wärme. Insgesamt ist von einer stark ansteigenden Bedeutung von erneuerbarem Strom als (Primär-)Energieträger auszugehen. Abbildung 3-1 zeigt eine schematische Verbrauchsstruktur der Sektoren Verkehr, Wärme und Strom.

36. Windenergie und Photovoltaik sind heute und in absehbarer Zukunft die vielversprechendsten und kostengünstigsten Technologien zur emissionsarmen Stromerzeugung (SRU 2011b; Agora Energiewende 2017a). Nachhaltig erzeugte Biomasse, insbesondere aus Reststoffen, steht in Deutschland nur begrenzt zur Verfügung (SRU 2007; BROSOWSKI et al. 2015). Durch hohe Anteile von fluktuierenden erneuerbaren Energien schwankt die Menge an verfügbarem Strom. Wünschenswert ist daher eine möglichst große Flexibilität der Stromnutzung in den Verbrauchssektoren. Um die schwankende Verfügbarkeit an erneuerbaren Energien auszugleichen, gibt es neben einer flexiblen Nachfrage seitens der Endverbraucher weitere Möglichkeiten, insbesondere Speichertechnologien und angepasster Netzausbau. Für eine zeitliche und örtliche Entkopplung von Erzeugung und

Abbildung 3-1

Schematische Darstellung einer dekarbonisierten Strom- und Wärmeversorgung



SRU 2017 (Icons erstellt von Freepik von www.flaticon.com)

Verbrauch können Stromspeicher direkt im Stromsektor aktiv sein (z. B. Batterien und Pumpspeicher), Sekundärprodukte wie Wasserstoff unter Nutzung von Strom bereitgestellt oder Strom in Form von Wärme gespeichert (Power-to-X – PtX) werden.

Wie der Verkehrssektor am sinnvollsten in eine klimaneutrale Energieversorgung integriert werden kann, hängt auch von Pfadentscheidungen in anderen Sektoren ab. Die Ausgestaltung der Stromerzeugung sowie die Entwicklung in den Sektoren Wärme und Industrie haben Rückwirkungen darauf, wie realistisch verschiedene Dekarbonisierungspfade im Verkehrssektor im Hinblick auf Technik und Kosten sind. In diesem Kontext sind unter anderem die folgenden Fragen relevant:

- Ist ein flexibles (Strom-)Nachfrageverhalten des Verkehrssektors von großer systemischer Bedeutung oder stellen andere Sektoren bereits ausreichend Flexibilität bereit?

- Wie hoch ist die Stromnachfrage der anderen Sektoren und wie hoch sind dadurch die (Grenz-)Kosten der Stromerzeugung zur Versorgung des Verkehrs?

- In welchem Maße werden Biomasse und synthetische Brennstoffe in den anderen Sektoren benötigt und stehen dem Verkehrssektor somit nur eingeschränkt bzw. zu hohen Kosten zur Verfügung?

3.1 Wärmeversorgung von Gebäuden

37. Der Gebäudewärmesektor ist mit knapp 800 TWh pro Jahr und rund 33 % einer der größten Endenergieverbraucher in Deutschland und für circa ein Drittel (AGEB 2017) der deutschen Treibhausgasemissionen verantwortlich. Die Energieeffizienzstrategie Gebäude des Bundesministeriums für Wirtschaft und Energie (BMWi 2015a) hat das Ziel, dass der Gebäudebestand bis 2050 nahezu klimaneutral ist. Kernziel ist, den (nicht erneuerbaren) Primärenergieverbrauch um 80 % gegenüber 2008 zu reduzieren. Erreicht werden soll dies durch eine Steigerung des Anteils erneuerbarer Energien am verbleibenden Energieverbrauch sowie die Reduktion des Endenergiebedarfs. Dies kann mittels Dämm- und Energieeffizienzmaßnahmen sowie einer Kombination von lokaler erneuerbarer Wärme, (Niedrigtemperatur-)

Vorabfassung - wird durch die endgültige Fassung ersetzt.

Wärmenetzen unter Berücksichtigung von kompakten Siedlungsstrukturen und erneuerbarem Strom unter Nutzung von Wärmepumpen erreicht werden.[1]

38. Die lokale solare und geothermische Strom- und Wärmebereitstellung, die Steigerung des Einsatzes von Wärmepumpen und die Nutzung von Fernwärmenetzen (insb. zur weiteren Verwertung von Industrieabwärme) scheint die kostengünstigste Kombination zu sein, um die klimapolitischen Ziele zu erreichen (Fraunhofer IWES und Fraunhofer IBP 2017). Die Potenzialgrenze für die Bereitstellung lokaler erneuerbarer Wärme in Gebäuden liegt bei circa 40 bis 50 % des heutigen Endenergieverbrauchs (THAMLING et al. 2015, S. 22). Das prognostizierte Endenergieeinsparpotenzial liegt bei einer Reduktion um circa 54 % gegenüber 2008 (ebd.). Dabei wird je nach Zielerreichung bei der Endenergieeinsparung im Gebäudesektor ein Teil des Endenergiebedarfs voraussichtlich durch Strom gedeckt. Das Lastprofil des durch Elektrifizierung der Gebäudewärme anfallenden zusätzlichen Stromverbrauchs beeinflusst den Stromsektor über die damit verbundenen Anforderungen an Flexibilität und Bereithaltung von abrufbarer Kapazität und Stromspeichern.

Alternativ zur direkten Stromnutzung sind strombasierte synthetische Energieträger (insb. Power-to-Gas – PtG) im Wärmesektor denkbar. Dieser Pfad hätte einen starken Anstieg des Strombedarfs gegenüber der Nutzung von Wärmepumpen zur Folge, dessen Deckung mit Umweltbelastungen einhergeht. Jedoch könnte durch den optimierten Einsatz von PtG im Stromsektor Flexibilität bereitgestellt werden, da hier keine zeitgleiche Erzeugung und Verbrauch nötig sind. Somit ist der Verbrauch unabhängig vom kurzfristigen Dargebot erneuerbarer Stromerzeugung. Aus systemischer Sicht sollten die begrenzten Potenziale nachhaltig erzeugter Biomasse vorwiegend nicht im Gebäudesektor eingesetzt werden, weil sie in anderen Sektoren (Schiffs- und Flugverkehr, Prozesswärme in der Industrie) voraussichtlich dringender benötigt werden.

39. Da der Gebäudebestand von langen Investitions- und Nutzungszyklen geprägt ist, müssen die langfristigen Klimaziele bereits heute in Neubaustandards und Sanierungsstrategien berücksichtigt werden. Durch Sanierung und Neubau ist eine Effizienzsteigerung hinsichtlich des Endenergiebedarfs von maximal circa 50 % erreichbar (THAMLING et al. 2015, S. 20). Bestehende Trends deuten aber darauf hin, dass die Ziele der Energieeffizienzstrategie Gebäude nicht erreicht werden. Insbesondere müsste hierfür eine energetische Sanierungsrate von circa 2 % pro Jahr erreicht werden (Fraunhofer IWES und Fraunhofer IBP 2017, S. 3), was fast einer Verdopplung der gegenwärtigen Rate entspricht und nur bei entsprechender Förderung und Zinssituation möglich ist.

3.2 Energieversorgung der Industrie

40. Der Industriesektor verbrauchte im Jahr 2015 knapp 30 % (715 TWh) der Endenergie Deutschlands. Der größte Endenergieverbraucher ist hierbei die Stahlindustrie, welche 21 % der gesamten Endenergie des Sektors verbraucht. Neben dieser stellen die Grundstoffchemie, das Papiergewerbe und die Verarbeitung von Steinen und Erden mit insgesamt circa 33 % am Gesamtendenergieverbrauch im Industriesektor die größten Verbraucher dar.

[1] Abweichende Auffassung von Prof. Lamia Messari-Becker nach § 9 Abs. 3 des Erlasses zur Errichtung des SRU: „Beim Prinzip der Sektorkopplung für die Erreichung der Klimaschutzziele und der Energiewende gilt es, der jeweiligen Besonderheit der betroffenen Sektoren Rechnung zu tragen. Das Gutachten geht von einer zentralen Rolle elektrischen Stroms bei der Versorgung von Verkehr, Industrie und Gebäude aus. Ferner geht das Gutachten von einer Dominanz bzw. zentralen Rolle der Energieträger Wind und Sonne (hier Photovoltaik) aus.
Zur These: Die These, dass mit Strom (aus Wind und Sonne) eine erneuerbare Energieversorgung weitgehend sichergestellt wird, wird nicht geteilt. Die wechselseitigen Auswirkungen des Umstiegs auf die jeweiligen Sektoren bleiben unklar. Beispielsweise kann im Falle eines längeren Zeitraums mit „wenig Wind, wenig Sonne“ bei einem vor allem auf „Power-to-Heat“ basierenden Wärmesystem ein Zurückgreifen auf andere Quellen notwendig sein, sofern die thermischen Speicher nicht ausreichen, den Bedarf zu decken.
Ein europäischer Strommarkt kann zwar hier unterstützend wirken. Allerdings sind auch Fragen der Effizienz, der Kosten, der Umsetzbarkeit und der Akzeptanz wichtig, die im Gutachten kaum adressiert werden.
Zum Gebäudesektor: Der Wärmebedarf im Gebäudesektor wird von Bestandsgebäuden dominiert, die hohe spezifische Verbräuche aufweisen. Hier besteht ein erhebliches Potenzial zur energetischen Sanierung. Hier ist eine erhebliche Diversifizierung zwischen Einspar- und Effizienzmaßnahmen erforderlich sowie seitens der Energiebereitstellung inkl. der Berücksichtigung von Solarthermie, Geothermie (hier als thermische Energieausbeute) und Biomasse sowie der Technologien aus baupraktischen, räumlichen, versorgungstechnischen und typologischen Gründen erforderlich. Die Alternativen für den Gebäudesektor außer der strombasierten angebotsseitigen Maßnahmen kommen zu kurz.“

Vorabfassung - wird durch die endgültige Fassung ersetzt.

Über 75 % des Endenergieverbrauchs der Industrie wurden 2015 in Deutschland für die Wärmebereitstellung aufgewendet. Davon entfallen 90 % auf Prozesswärme, was die hohe Bedeutung dieses Bereiches belegt. Dabei macht der Prozesswärmebedarf auf einem Temperaturniveau von über 500 °C über 57 % aus, der Wärmebedarf auf einem Temperaturniveau unter 100 °C beträgt lediglich 25 % (NAEGLER et al. 2016).

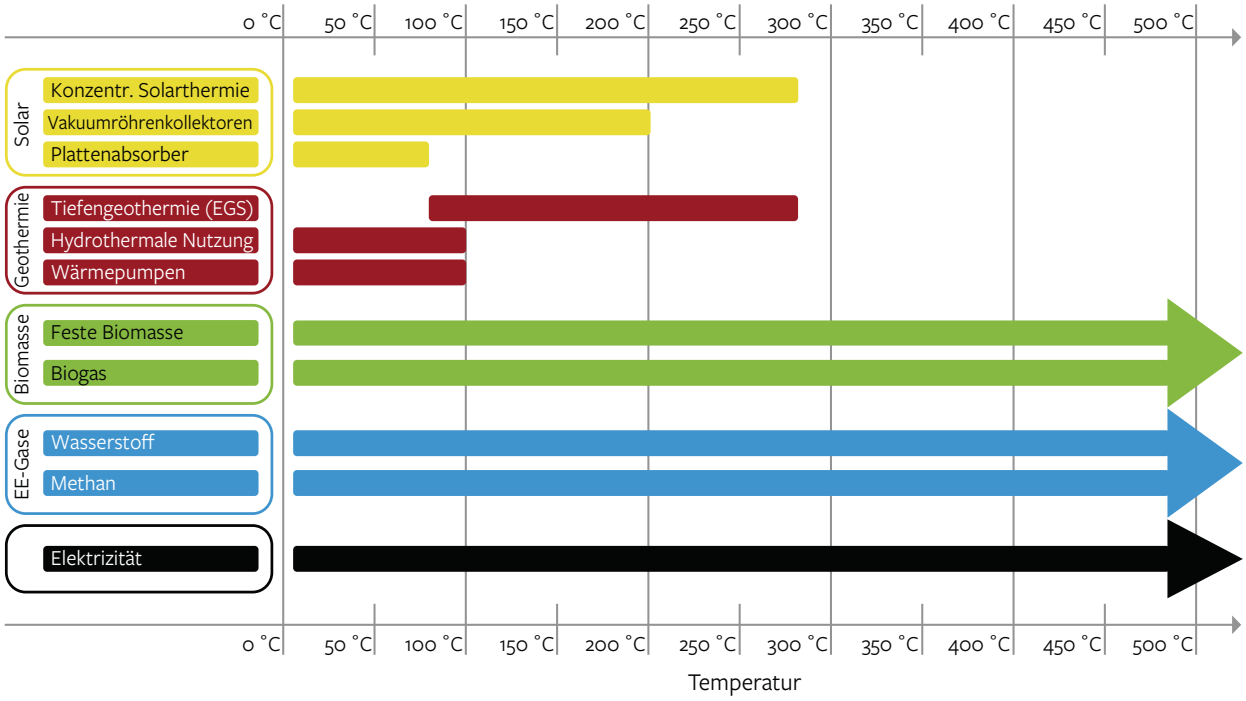
Nur dieses Temperaturniveau unter 100 °C kann kostengünstig durch Wärmepumpen und Solarkollektoren dekarbonisiert werden (Abb. 3-2). Die Dekarbonisierung des Hochtemperaturbedarfs erfordert entweder die Elektrifizierung der bisher mit direkten Brennstoffen arbeitenden Prozesse oder – falls eine direkte Elektrifizierung nicht möglich ist – die Substitution der fossilen Brennstoffe durch Biomasse, -gas oder synthetische Energieträger. Neben einer somit vermutlich stark ansteigenden Stromnachfrage sind auch entstehende Kosten durch einen Neu- oder Umbau von industriellen Produktionsanlagen zu beachten (FLEITER et al. 2013).

41. Neben energieversorgungsbedingten Emissionen müssen im Rahmen einer umfassenden Klimaschutzstrategie für den Industriesektor auch prozessbedingte CO_2-Emissionen reduziert werden. Beispielsweise ist bei der Bereitstellung von Prozesswärme zu beachten, dass manche Energieträger nicht ausschließlich zur Wärmeerzeugung genutzt werden, sondern teilweise als Reaktant (wie z. B. in Form von Koks als Reduktionsmittel im Hochofenprozess) für Herstellungsprozesse erforderlich sind. In diesen Fällen muss, falls eine Umstellung der Prozesse nicht möglich ist, eine Substitution durch biogene oder synthetische Energieträger erfolgen. Die über die reine Wärmebereitstellung hinausgehenden prozessbedingten Emissionen stellen vor allem in der Stahlindustrie, der Zement- und Kalkindustrie sowie in der chemischen Industrie eine Herausforderung dar (UBA 2014, S. 232). Dabei kommt der Abscheidung und Nutzung von CO_2 eine besondere Rolle zu, denn die Industrie ist hierbei gleichzeitig Quelle und Nutzer des CO_2.

Es zeigt sich, dass die Dekarbonisierung der Industrie im Vergleich zu anderen Sektoren eine besondere Herausforderung darstellt, weil nur ein sehr kleiner Teil der Prozesse bereits elektrifiziert ist, ein hoher zusätzlicher Strombedarf zu erwarten ist und zudem für einen Teil der Prozesse keine Alternativen zu synthetischen Energieträgern bestehen.

Abbildung 3-2

Mit erneuerbaren Wärmequellen erzielbare Temperaturbereiche



Quelle: NAEGLER et al. 2016, überarbeitet

Vorabfassung - wird durch die endgültige Fassung ersetzt.

3.3 Intersektorale Wechselwirkungen

42. Die Annahme einer weitgehenden Elektrifizierung der Sektoren Wärme, Verkehr und Industrie hat weitreichende Folgen für den Stromsektor. Diese hängen stark von den Effizienzsteigerungen in den einzelnen Sektoren ab und dem Grad der Flexibilität, der innerhalb der jeweiligen Sektoren sowie durch eine Kopplung mit anderen Sektoren bereitgestellt werden kann. Sowohl die Konkurrenz um erneuerbare Energie als auch die Potenziale für einen intersektoralen Austausch von Flexibilität stehen maßgeblich mit der Konfiguration des gesamten Energiesystems in Zusammenhang. In einem dekarbonisierten Energiesystem bestehen grundsätzlich viele Möglichkeiten, die Sektoren miteinander zu koppeln. Abbildung 3-3 stellt Optionen für die Kopplung der Sektoren Verkehr, Wärme und Industrie dar. Welche der dargestellten Verbindungen realisiert werden, hängt von der zukünftigen technologischen und politischen Entwicklung ab.

Im Zuge einer zunehmenden Sektorkopplung ist eine Dekarbonisierung der Stromerzeugung unabdingbar, da sonst eine Verlagerung von CO_2-Emissionen aus den Verbrauchssektoren in den Stromsektor auftreten würde, ohne dass eine hinreichende Netto-CO_2-Einsparung erreicht würde. Die Produktion von Strom kann aus fluktuierenden Energiequellen mithilfe von Photovoltaik, On- und Offshore-Windwindkraftanlagen, durch Wasserkraftwerke, Biomasse oder Tiefengeothermiekraftwerke erfolgen. Der Strom kann über das Stromnetz verteilt und direkt genutzt oder in Pumpspeichern und Batterien zwischengespeichert werden. Die auf diese Art speicherbaren Strommengen und die Abgabeleistungen der Speicher reichen derzeit allerdings noch nicht aus, um die zu erwartenden Fluktuationen der Stromerzeugung über längere Zeiträume auffangen zu können. Daher ist von einem steigenden Flexibilitätsbedarf auszugehen (Fraunhofer IWES 2015).

43. Falls keine direkte Nutzung elektrischer Energie möglich ist, aber dennoch im Stromsektor erzeugte Energie genutzt werden soll, bieten sich Sekundärnutzungen an, bei denen mithilfe von Strom synthetische Energieträger hergestellt werden. Hierdurch kann eine längerfristige chemische Speicherung von elektrischer Energie erfolgen (vgl. dazu SRU 2013). Neben der Nutzung für bestimmte Anwendungen im Verkehrsbereich können synthetische Kraftstoffe vor allem für nicht direkt elektrifizierbare Anwendungen oder für nicht energetische Anwendungen in der Industrie genutzt werden.

Als weitere Umwandlungsoption kann Strom mithilfe von Power-to-Heat-Anwendungen (bspw. Elektroheizungen oder Wärmepumpen) in Wärme umgewandelt werden. Die erzeugte Wärme kann entweder direkt zur Bereitstellung von Raumwärme, Warmwasser oder Hochtemperaturwärme (nur bei direkt-elektrischer Wärmeerzeugung) genutzt, in Wärmenetze eingespeist oder anderweitig (z. B. Großwärmespeicher) zwischengespeichert werden (Fraunhofer IWES und Fraunhofer IBP 2017).

Bei Nutzung synthetisierter Energieträger fallen – gegenüber einer direkten Elektrifizierung von Prozessen – in den meisten Verbrauchssektoren nur geringe Umstellungskosten an. Jedoch sind für das Synthetisieren chemischer Energieträger aufgrund des niedrigen Wirkungsgrads große Strommengen erforderlich. Diese führen zu vergleichsweise hohen Energiekosten, welche langfristig die Kosten für neue Infrastruktur übersteigen (SCHMIED et al. 2015). Zudem führt eine intensive Nutzung synthetisierter Energieträger zu verstärkter Konkurrenz um erneuerbaren Strom.

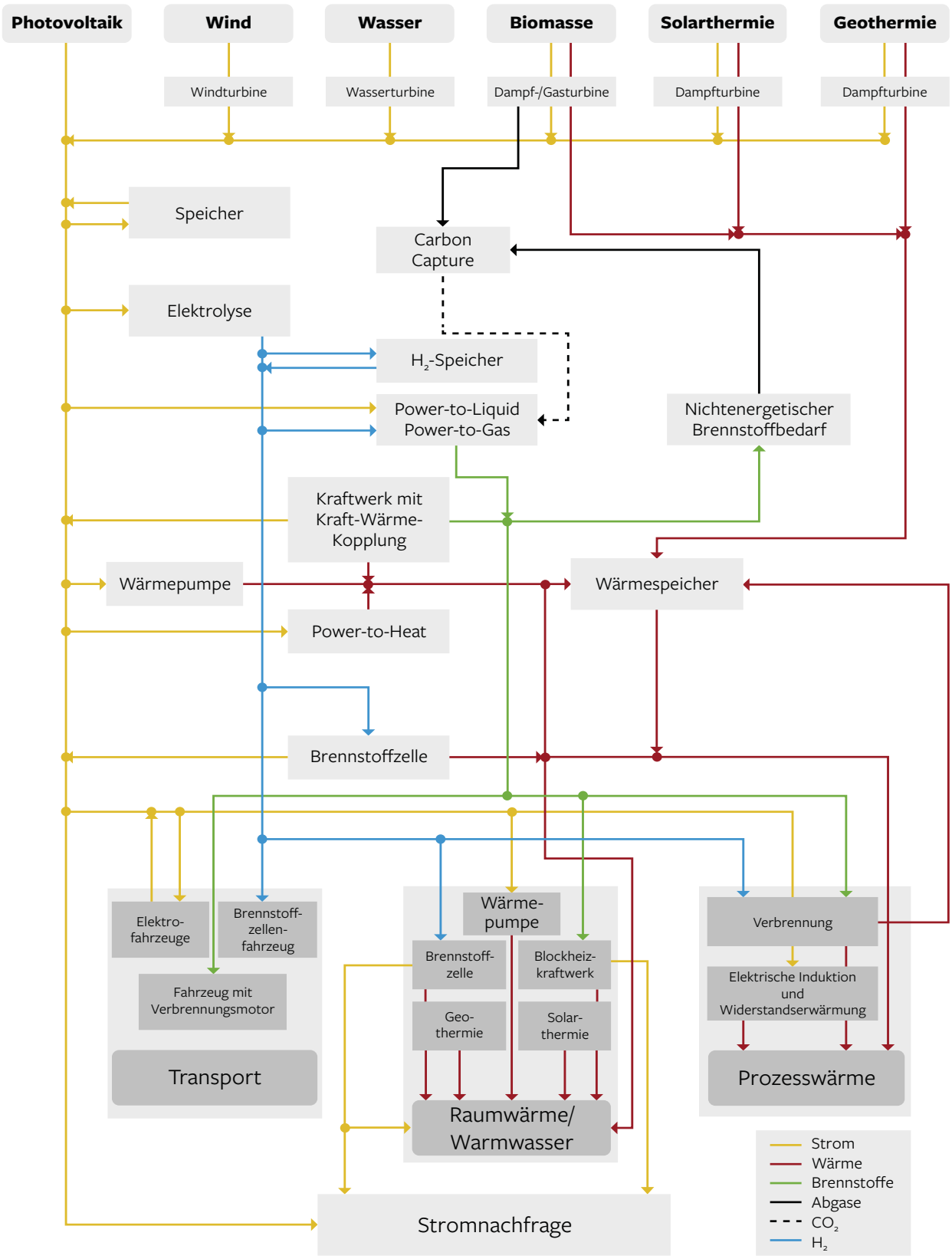
44. Nicht nur die Gesamtstromnachfrage, sondern auch die Flexibilität aller Teile des Stromsystems – der Stromerzeugung, der Speichermöglichkeiten und der Verbraucher – sind entscheidende Faktoren für die Höhe der Gesamtkosten der Energiebereitstellung. So können die Gesamtkosten der Stromversorgung sowohl durch Effizienzmaßnahmen als auch durch flexible Nachfrage und Erzeugung reduziert werden (Ecofys 2016b). Wenn die Nachfrage nach Strom flexibel gestaltet werden kann (z. B. durch flexible Wärmepumpen zur Fernwärme-, Raumwärme- und Warmwassererzeugung, Wärmespeicher, gesteuertes Laden von Elektrofahrzeugen), werden weniger Stromerzeugungskapazitäten oder -speicherkapazitäten benötigt und die durchschnittlichen Stromerzeugungskosten sind geringer. So könnten die möglicherweise höheren Kosten für flexible Nachfragetechnologien (bspw. in Form von zusätzlichen lokalen Speichern, schnell regelbaren Anlagen oder bewusster Anlagenüberdimensionierung) kompensiert werden. Wird die Nachfrage (der Endverbraucher) nach Strom hingegen weniger flexibel gestaltet, zum Beispiel durch ungesteuertes Laden von Elektrofahrzeugen oder Hochtemperatur-Wärmebereitstellung durch Strom, muss eine große Erzeugungs- bzw. Speicherleistung (für kurze Zeiträume) vorgehalten werden. Dadurch erhöhen sich die Stromerzeugungskosten. Dabei ist zu berücksichtigen, dass mit steigendem Strombedarf und erhöhter Spitzenlast zunehmend auch ungünstigere – und damit teurere – Standorte für Stromerzeugungskapazitäten erschlossen werden müssen.

Vorabfassung - wird durch die endgültige Fassung ersetzt.

Vorabfassung - wird durch die endgültige Fassung ersetzt.

Abbildung 3-3

Optionen der Sektorkopplung in einem dekarbonisierten Energiesystem



SRU 2017; Datenquelle: BMWi 2015b; UBA 2016b; MARSCHEIDER-WEIDEMANN et al. 2016

Damit hat die Technologiewahl in einem Sektor auch Auswirkungen auf die Flexibilitätserfordernisse und Energieträgerwahl in anderen Sektoren. Wenn Lasten zwischen Sektoren verschoben werden und einzelne Sektoren große Flexibilitätspotenziale (zu moderaten Kosten) zur Verfügung stellen können, sinkt das Erfordernis nach einem flexiblen Lastprofil in anderen Sektoren. Dies kann die Technologiewahl insbesondere dann beeinflussen, wenn verschiedene Dekarbonisierungspfade unterschiedliche Eigenschaften mit Blick auf einerseits ihre Wirkungsgrade und andererseits ihre Flexibilität aufweisen. Kann die Volatilität der Einspeisung aus erneuerbaren Energien bereits in größerem Umfang durch andere Sektoren aufgefangen werden, gewinnen Wirkungsgrad- und Effizienzerwägungen bei der Technologiewahl an Gewicht.

3.4 Gesamtwirtschaftliche Dekarbonisierungsszenarien

Dekarbonisierung ist technisch und wirtschaftlich darstellbar

45. Zahlreiche Studien (s. Tab. 3-1) zeigen die technische und ökonomische Machbarkeit einer nahezu vollständigen Dekarbonisierung bis zum Jahr 2050, allerdings unterscheiden sie sich in ihren technischen Transformationspfaden. Einen großen Einfluss auf den Transformationspfad haben zum einen die getroffenen Annahmen zu möglichen Entwicklungen der Endenergienachfrage der Sektoren Strom, Wärme und Verkehr. Zum anderen unterscheiden sich die Studien meist in den verwendeten Bilanzgrenzen des Energiesystems und den Annahmen zum Importbedarf von (synthetischen) Brennstoffen. Diese Annahmen haben großen Einfluss auf die Bewertung der Bedarfe für die direkte Nutzung von Strom und für die Herstellung von synthetischen Brennstoffen.

46. Die analysierten Studien zeigen eine große Bandbreite möglicher Dekarbonisierungsoptionen auf. Vorwiegend wird eine Minderung der Treibhausgasemissionen um 80 bis 95 % oder 100 % als Ziel angenommen. Dabei ist der Grad der Dekarbonisierung in der Regel keine endogene Variable, sondern exogen vorgegeben, und wird zum Teil durch verschiedene Szenarien analysiert. Die analysierten Studien fokussieren dabei größtenteils auf eine Zielerreichung des Dekarbonisierungsgrades bis zum Jahr 2050, mit Ausnahme der Untersuchung von QUASCHNING (2016), in der eine fast vollständige Dekarbonisierung bereits im Jahr 2040 angenommen wird. In Trendszenarien wird der Grad der Dekarbonisierung nicht exogen vorgegeben, sondern ist Ergebnis der Fortschreibung der aktuellen oder antizipierten Maßnahmeneffekte. Hier zeigt sich, dass die bisherigen Ziele und Maßnahmen der Bundesregierung nicht ambitioniert genug sind, um bis zum Jahr 2050 eine Reduktion der Treibhausgasemissionen um 95 % zu erreichen. Die politisch gesetzten Ziele für das Jahr 2030 reichen nur knapp aus, um eine Minderung um 80 % bis zum Jahr 2050 zu erzielen. Öko-Institut und Fraunhofer ISI (2015, S. 439 f.) merken an, dass die technischen und wirtschaftlichen Potenziale für eine Treibhausgasminderung um 80 % vorhanden sind, allerdings auch ausgeschöpft werden müssen, was bisher nicht der Fall ist.

48. Nicht nur die Summe des Stromverbrauchs ist relevant, zu jedem Zeitpunkt müssen sich auch Stromerzeugung, Speicheraktivitäten und Verbrauch die Waage halten. Weiterhin müssen auch Höchstlasten vom Stromsystem aufgefangen werden können. Insbesondere in einem System mit hohen Anteilen erneuerbarer Energien müssen in Zeiten niedriger Verfügbarkeit ausreichend nicht-dargebotsabhängige Erzeugungs- oder Speicherkapazitäten bereitstehen. Die in der Literatur für 2050 ermittelten Jahreshöchstlasten steigen nur moderat. FLEITER et al. (2013) ermitteln eine Jahreshöchstlast von circa 60 GW, Agora Energiewende (STERNER et al. 2014) sowie NITSCH (2016) dagegen Jahreshöchstlasten von etwa 80 GW. Nur KNORR et al. (2014) sehen im Szenario „100%-EE“ eine Jahreshöchstlast von circa 110 GW. Der Flexibilitätsbedarf, welcher kurz- und langfristig durch Stromspeicher gedeckt werden muss, variiert innerhalb der Studien. Oftmals wird nicht von einem Ausbau von Pumpspeicherkapazitäten ausgegangen. Batteriespeicher decken den zusätzlichen Flexibilitätsbedarf oder es erfolgt keine genaue Ausweisung der zusätzlichen Speicherkapazitäten. Für das Jahr 2050 werden je nach Szenarioannahmen zwischen 8 GW (ECKE et al. 2017), 15 GW (GERHARDT et al. 2015) oder circa 75 GW (HENNING und PALZER 2015) Stromspeicher aus Batterien ermittelt.

Zubaubedarf für erneuerbare Stromerzeugungskapazitäten zeigt hohe Bandbreite

49. Abhängig von der zugrunde gelegten Stromnachfrage und den Speicherkapazitäten variiert auch der Bedarf an erneuerbarer Stromerzeugung und den dafür benötigten Kapazitäten erheblich (Abb. 3-4). Generell lässt sich feststellen, dass die notwendigen Kapazitäten von erneuerbaren Energien analog zum Gesamtstrombedarf mit dem Grad der Dekarbonisierung ansteigen.

Vorabfassung - wird durch die endgültige Fassung ersetzt.

Tabelle 3-1

Stromnachfrage und Dekarbonisierung in verschiedenen Szenarien

			Dekarbonisierung gegenüber 1990 [%]	
Studie	**Szenario**	**Jahr**	**Gesamt**	**Strom-sektor**
UBA 2014	THGND 2050	2050	95	100
Prognos, EWI, GWS (SCHLESINGER et al. 2014)	Zielszenario	2050	80	83
Prognos, EWI, GWS (SCHLESINGER et al. 2014)	Trendszenario	2050	65	69
Fraunhofer IWES et al. (KNORR et al. 2014)	100%-EE-Szenario	–	k. A.	k. A.
Fraunhofer IWES et al. (GERHARDT et al. 2015)	Zielszenario	2050	80	80
HENNING und PALZER 2015	85/amb/Mix/beschl.	2050	85	k. A.
Öko-Institut und Fraunhofer ISI 2015	Aktuelle Maßnahmen	2050	54	60,4
Öko-Institut und Fraunhofer ISI 2015	Klimaschutzszenario 95	2050	95	95,7
NITSCH 2016	Klima 2050	2050	95	100
QUASCHNING 2016	Mit Effizienzmaßnahmen	2040	100	100
QUASCHNING 2016	Ohne Effizienzmaßnahmen	2040	100	100
Enervis (ECKE et al. 2017)	Graue Elektrifizierung/ Grüne Elektrifizierung	2050	75–82	85
Enervis (ECKE et al. 2017)	Grüne Vollelektrifizierung	2050	95	100
Enervis (ECKE et al. 2017)	Grünes Gas	2050	95	100
Agora Energiewende 2017a		2030	55	62
GERHARDT et al. 2017	Klimawirksamkeit Elektromobilität	2050	95	≈99
Fraunhofer ISI, Consentec, IFEU (PFLUGER et al. 2017)	Referenzszenario	2050	54	59
Fraunhofer ISI, Consentec, IFEU (PFLUGER et al. 2017)	Basiszenario	2050	82	88

Vorabfassung - wird durch die endgültige Fassung ersetzt.

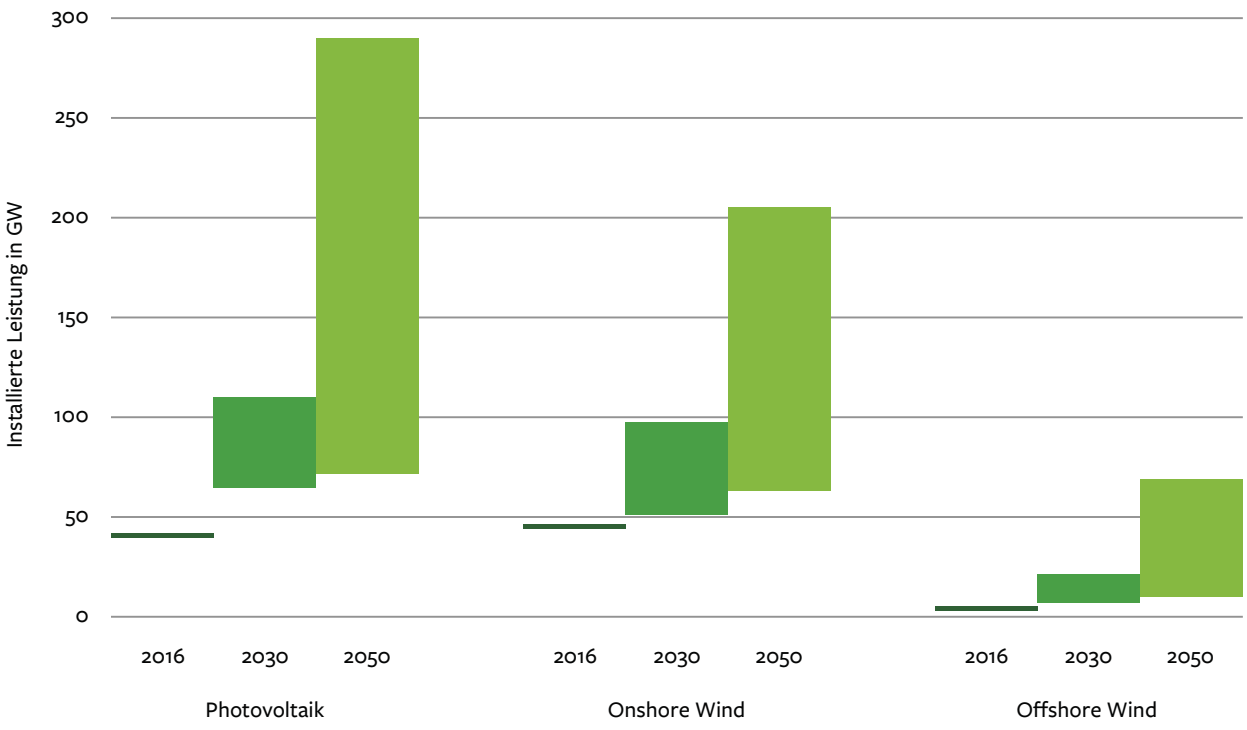
	Stromnachfrage [TWh]						
	Gesamt	Traditionell	Wärme	Verkehr	Industrie	PtX für Brennstoff	Verluste
	3.000	465,8	61,9	91	k. A.	2.100	k. A.
	475	k. A.	k. A.	128	k. A.	5,56	k. A.
	554	k. A.	k. A.	82	k. A.	6,12	k. A.
	601,2	450	20,7	42,8	k. A.	50,9	18
	793	455	191	111	k. A.	31	5,6
	733	≈360	97	51	k. A.	200	56
	630	582	0	36	0	0	12
	779	502	16	82	k. A.	157	22
	1.107	k. A.	182,92	65,33	k. A.	k. A.	k. A.
	1.320	500	150	200	250	k. A.	220
	3.120	600	770	700	530	k. A.	520
	600	≈400	139	≈60	k. A.	k. A.	k. A.
	790	≈400	331	≈60	k. A.	0	k. A.
	1.450	≈400	30		k. A.	600	k. A.
	770	470	200	60	k. A.	k. A.	40
	838	≈480	≈180	166	k. A.	Import	k. A.
	629,6	501,9	35,9	30,5	1,7	0	36,6
	612,4	417,2	39,7	86,9	21,1	0	36,6

SRU 2017

Vorabfassung - wird durch die endgültige Fassung ersetzt.

Abbildung 3-4

Bandbreite der prognostizierten erneuerbaren Stromerzeugungskapazitäten in verschiedenen Studien



SRU 2017

Für das Jahr 2030 schwanken die prognostizierten Stromerzeugungskapazitäten für Photovoltaik zwischen 68 GW und 109 GW. Für Onshore Wind ist die Bandbreite mit Werten zwischen 51 GW und 97 GW ähnlich hoch, für Offshore Wind ist sie mit Werten zwischen 11 GW und 22 GW kleiner. Für das Jahr 2050 sind die prognostizierten Bandbreiten sehr viel größer. Hier werden für Photovoltaik Werte zwischen 75 GW und 290 GW angenommen, für Onshore Wind installierte Leistungen zwischen 64 GW und 204 GW sowie für Offshore Wind zwischen 15 GW und 70 GW.

50. Obwohl die installierten Kapazitäten der Photovoltaik zunächst hoch erscheinen, ist die Erzeugung durch Windkraft aufgrund höherer Volllaststunden in allen Szenarien mindestens doppelt so hoch wie die aus Photovoltaik (Tab. 3-2, die weitere Studien zur Stromerzeugungskapazität enthält). Die Stromerzeugung aus erneuerbaren Energien der analysierten Studien mit 80 % Treibhausgasminderung liegt zwischen 300 TWh und 680 TWh. Insbesondere in ambitionierten Zielszenarien werden entsprechend höhere Strommengen zwischen rund 700 TWh (Öko-Institut und Fraunhofer ISI 2015) und 1.520 TWh (ECKE et al. 2017, Szenario Grünes Gas) erreicht (Tab. 3-2). Das Ausbaupotenzial erneuerbarer Energien stellt in den vorliegenden Studien meist keinen begrenzenden Faktor dar. Das UBA ermittelt Stromerzeugungsmengen aus Onshore Windkraft bis zu 1.000 TWh und Photovoltaik bis zu 248 TWh (UBA 2014). Die Stromerzeugung aus Biomasse wird in der Mehrzahl der Studien wenig ausgeweitet, da das begrenzte Potential von 375 TWh (thermisch) in anderen Sektoren benötigt wird (NITSCH et al. 2012; ZEDDIES et al. 2012). Die Stromerzeugung aus Geothermie spielt in den meisten Studien nur eine untergeordnete Rolle. Das UBA geht in der Studie aus dem Jahr 2014 jedoch von einer Stromerzeugung von bis zu 50 TWh aus (UBA 2014). Der Stromerzeugung muss gleichzeitig der Stromverbrauch aller Sektoren gegenübergestellt werden, um potenzielle Importbedarfe aus Nachbarländern identifizieren zu können. Die Stromimporte und -exporte sind in allen analysierten Studien unter 50 TWh/a. Somit findet im Stromsektor keine übermäßige Verlagerung der Dekarbonisierungsanstrengungen in Nachbarländer statt.

Vorabfassung - wird durch die endgültige Fassung ersetzt.

Vorabfassung - wird durch die endgültige Fassung ersetzt.

Synthetische Brennstoffe sind entscheidend für eine vollständige Dekarbonisierung aller Sektoren

51. Es wird allgemein angenommen, dass die Stromversorgung auch bei einem sehr hohen Dekarbonisierungsgrad des Stromsektors aus heimischen Quellen abgedeckt werden kann. Im Bereich der synthetischen Energieträger (Wasserstoff, synthetisches Methan und Kraftstoffe) zeigt sich hingegen ein anderes Bild. Hier gehen die meisten Studien von einem großen Importbedarf im Bereich zwischen 20 TWh und 1.200 TWh aus. Die für die Produktion der synthetischen Energieträger notwendigen Stromerzeugungskapazitäten und damit der notwendige Flächenbedarf für bis zu 3.000 TWh erneuerbaren Strom werden ins Ausland verlagert. Somit wird durch unterschiedliches Setzen der betrachteten Systemgrenzen ein Großteil der Herausforderungen der Energiewende vernachlässigt. Einzig bei Enervis (ECKE et al. 2017) und QUASCHNING (2016) wird eine Dekarbonisierung von 95 % durch größtenteils in Deutschland stattfindende erneuerbare Energieerzeugung erreicht.

Dabei ist zu berücksichtigen, dass synthetische Brennstoffe für ein Gelingen der Energiewende als entscheidend angesehen werden. Insbesondere im Industriesektor (bis zu 500 TWh: UBA 2014) sind diese aufgrund industrieller Herstellungsprozesse nötig. Jedoch kommt es je nach Studie auch im Verkehrssektor (bis zu 533 TWh: ebd.) zu einer starken Nutzung dieser synthetischen Brennstoffe. Neben dem Nachteil hoher Umwandlungsverluste bietet die Herstellung synthetischer Energieträger auch Vorteile in Form erhöhter Flexibilität, da eine langfristige Speicherung möglich ist. Zudem können mit den erzeugten chemischen Energieträgern systemdienliche, steuerbare Kraftwerke betrieben werden, um so der Fluktuation der erneuerbaren Stromerzeugung entgegenzuwirken. Hierdurch können potenziell notwendige Überkapazitäten an erneuerbaren Energien zum Teil reduziert werden.

3.5 Rohstoffbedarf für die Stromversorgung und Kreislaufführung der Rohstoffe

52. Ein klimaneutrales Verkehrssystem wird zu einer deutlichen Zunahme des Strombedarfs im Verkehrssektor führen (s. Tab. 3-1). Im Folgenden werden deshalb die Rohstoffbedarfe und die Kreislauffähigkeit der Komponenten des dekarbonisierten Stromsystems (Stromerzeugungstechnologien, Netze, Speicher) betrachtet. Zu berücksichtigen ist, dass durch die Umstellung von der Nutzung fossiler Energieträger auf erneuerbare Energieträger zukünftig auch Rohstoffbedarfe wegfallen werden. So werden für die Exploration und Produktion von Öl zum Beispiel spezifische, legierte Stahlsorten (insb. für Rohrleitungen), Kupfer für Motoren sowie Platingruppenmetalle und Seltene Erden für Katalysatoren benötigt (ZEPF et al. 2014).

3.5.1 Stromerzeugungstechnologien

53. Die verschiedenen Szenarien zum Umbau des Stromsektors gehen von unterschiedlichen Annahmen der zu installierenden Leistung sowie des verwendeten Technologiemix zur Stromerzeugung aus. Gemeinsam ist den Szenarien die deutliche Dominanz von Windkraftanlagen und Photovoltaikmodulen (s. Kap. 3.4).

Windenergie

54. Abbildung 3-5 zeigt vereinfacht die Rohstoffe, die für die verschiedenen Bestandteile einer Windkraftanlage eingesetzt werden.

Zu einem großen Teil werden für On- und Offshore-Windkraftanlagen dieselben Rohstoffe benötigt. Unterschiedlich sind – aufgrund der verschiedenen Fundamenttypen – die benötigten Mengen an Beton und Stahl.

Glasfaserverstärkte Kunststoffe (GFK) werden sowohl für die Rotorblätter als auch für die Gondel eingesetzt. Für die Rotorblätter werden außerdem kohlenstofffaserverstärkte Kunststoffe (CFK) oder Verbunde aus GFK und CFK genutzt. Daneben wird der Einsatz von Rotorblättern aus Stahl erforscht. Diese haben zwar ein höheres spezifisches Gewicht, weshalb die Nennleistung pro Anlage begrenzt ist, lassen sich jedoch schneller und kostengünstiger produzieren und deutlich besser rezyklieren (FERNÁNDEZ et al. 2015; QUITTER 2011). Da die Getriebe dieser Anlagen wegen des höheren spezifischen Gewichts in der Regel größer ausgelegt sind und aufgrund der größeren Trägheit weniger belastet werden, sind die Anlagen mit Stahlflügeln weniger anfällig für Windböen und benötigen weniger Wartung (WERNER 2017). Insbesondere für kleinere Anlagen sind Stahlflügel eine recyclingfreundliche Option (EFB 2012).

Tabelle 3-2

Stromerzeugung und Kapazitäten in verschiedenen Szenarien

			Stromerzeugung [TWh]		
Studie	**Szenario**	**Jahr**	**Wind Onshore**	**Wind Offshore**	**Photo-voltaik**
Prognos, EWI, GWS (SCHLESINGER et al. 2014)	Trendszenario	2050	136	73	73,1
Prognos, EWI, GWS (SCHLESINGER et al. 2014)	Zielszenario	2050	150	64	75
UBA 2014	THGND 2050	2050	bis zu 1.000	180	bis zu 248
Fraunhofer IWES et al. (KNORR et al. 2014)	100%-EE-Szenario	–	225	155	120
Öko-Institut und Fraunhofer ISI 2015	Aktuelle Maßnahmen	2050	207,84	94	59,1
Öko-Institut und Fraunhofer ISI 2015	Klimaschutzszenario 95	2050	389,7	180	123,4
HENNING und PALZER 2015	85/amb/Mix/beschl.	2050	377	127	174
HENNING und PALZER 2015	90/amb/Mix/beschl.	2050	k. A.	k. A.	k. A.
Greenpeace 2015	–	2050	139	169	97
Fraunhofer IWES et al. (GERHARDT et al. 2015)	Zielszenario	2050	313	160	190
QUASCHNING 2016	Mit Effizienzmaßnahmen	2040	498	343	394
NITSCH 2016	Klima 2050	2050			1.093
Fraunhofer ISI, Consentec, IFEU (PFLUGER et al. 2017)	Referenzszenario	2050	192,3	30,7	14,9
Fraunhofer ISI, Consentec, IFEU (PFLUGER et al. 2017)	Basiszenario	2050	266	69,1	63,2
Enervis (ECKE et al. 2017)	Graue Elektrifizierung/ Grüne Elektrifizierung	2050	300	90	70
Enervis (ECKE et al. 2017)	Grüne Vollelektrifizierung	2050	550	250	100
Enervis (ECKE et al. 2017)	Grünes Gas	2050	900	400	180
GERHARDT et al. 2017	Klimawirksamkeit Elektromobilität	2050	371–436	123,3–140	157,9–181
Agora Energiewende 2017a	–	2030	180	80	90

Vorabfassung - wird durch die endgültige Fassung ersetzt.

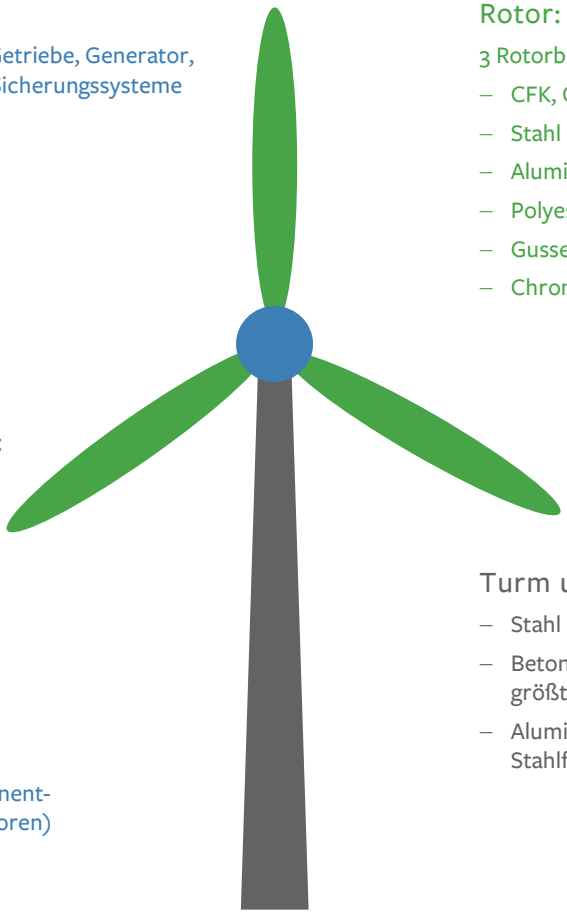
Stromerzeugung [TWh]	Installierte Stromerzeugungskapazitäten [GW]					
	Biomasse	**Wind Onshore**	**Wind Offshore**	**Photo-voltaik**	**Biomasse**	**Speicher**
	52	64	21	75	8	k. A.
	60	70	18	78	12	k. A.
	23	bis zu 1.190	45	bis zu 275	k. A.	k. A.
	60,5 davon 26 aus Biomethan	87	40	134	17	11,2 GW Pumpspeicher, 55 GW Batterien
	k. A.	80	23,5	62,3	1,6	9,3 GW Pumpspeicher
	3,2	150	45	130	k. A.	15,7 GW Pumpspeicher
	k. A.	168	33	166	32	74 GW Batterien
	k. A.	204	42	290	29	k. A.
	38	95	52	110	9	k. A.
	k. A.	140	39	200	k. A.	k. A.
	k. A.	199	76	415	k. A.	k. A.
		136	70	178	12	k. A.
	6	52,6	6,5	15,7	1,3	7,4
	6	75,4	15	69,3	1,3	7,4
	20	k. A.	k. A.	k. A.	k. A.	gering
	50	k. A.	k. A.	k. A.	k. A.	gering
	40	k. A.	k. A.	k. A.	k. A.	gering
	8,6	k. A.	k. A.	k. A.	k. A.	k. A.
	20	91	20	86	k. A.	k. A.

SRU 2017

Vorabfassung - wird durch die endgültige Fassung ersetzt.

Abbildung 3-5

Rohstoffe für Windkraftanlagen



SRU 2017; Datenquelle: BMWi 2015b; UBA 2016b; MARSCHEIDER-WEIDEMANN et al. 2016

55. Ein weiterer Rohstoffbedarf ergibt sich aus der Art der eingesetzten Turbine. Aus Rohstoffsicht relevant ist, dass permanentmagnetisch erregte Generatoren im Gegensatz zu elektrisch erregten Generatoren Magnete aus Seltenen Erden erfordern. Die jeweils benötigten Mengen variieren für Neodym und Dysprosium zwischen 27 und 217 kg/MW (MARSCHEIDER-WEIDEMANN et al. 2016, S. 181). Während im Jahr 2005 noch keine Windkraftanlage mit dieser Art Generator weltweit installiert war (SERRANO-GONZÁLEZ und LACAL-ARÁNTEGUI 2016), betrug ihr Anteil an den Neuinstallationen im Jahr 2009 circa 9 % (BUCHERT 2011) und im Jahr 2011 circa 14 % (Öko-Institut 2011). Mit dem Ausbau der Offshore-Windkraftanlagen wird der Anteil der permanentmagnetisch erregten Windkraftanlagen – darunter insbesondere die getriebelosen Direct-Drive-Windkraftanlagen, die den höchsten Bedarf an Seltenen Erden haben – voraussichtlich zunehmen (MARSCHEIDER-WEIDEMANN et al. 2016, S. 183).

56. Prinzipiell ist ein großer Massenanteil der Windkraftanlagen gut rezyklierbar, da insbesondere für die Bauteile aus Stahl, Kupfer und Gusseisen etablierte Recyclingwege in Deutschland bestehen. Auch das Fundament (Beton) wird stofflich verwertet – allerdings in der Regel als Untergrundverfüllung im Straßenbau und nicht hochwertig im Hochbau (SEILER und WOIDASKY 2013; KAISER und SEITZ 2014).

Die Verwertung der Rotorblätter aus GFK bzw. CFK stellt sich hingegen schwieriger dar. Ein gängiger Verwertungsweg für GFK ist die Mitverbrennung im Zementwerk als Ersatz für den Energieträger Braunkohle und den Zuschlagstoff Asche (WOIDASKY 2013; QUICKER und

Vorabfassung - wird durch die endgültige Fassung ersetzt.

STOCKSCHLÄDER 2017). Ein Verwertungsweg für CFK ist die Pyrolyse, bei der die Kohlenstofffasern zwar zurückgewonnen werden, jedoch deutlich verkürzt sind und somit nicht wieder für den ursprünglichen Zweck eingesetzt werden können (WOIDASKY 2013; BAH 2017). Eine hochwertige stoffliche Verwertung im Sinne des Kreislaufwirtschaftsgesetzes findet damit nicht statt (PEHLKEN et al. 2017). Da die Herstellung von Kohlenstofffasern sehr energie- und kostenintensiv ist, wird an hochwertigeren Verwertungswegen geforscht. Ein weiterer Ansatz neben der Pyrolyse ist die Solvolyse, bei der die Fasern durch chemische Auflösung der Kunststoffmatrix freigelegt werden (WAMBACH et al. 2017). Bezüglich der Nutzung der gewonnenen Fasern wird zum Beispiel die Herstellung von Hybridgarnen erprobt (s. a. Tz. 152; ECKERT 2017; WOIDASKY 2013).

Für Windkraftanlagen mit permanentmagnetisch erregten Generatoren ist das Recycling des Elektromotors aufgrund der großen eingesetzten Mengen an Seltenen Erden relevant. Hierfür existieren – im Gegensatz zu beispielsweise Japan und China – in Deutschland und Europa bisher keine etablierten Recyclingwege (SCHÜLER et al. 2011). Mögliche Verfahren befinden sich in der Erforschung und Erprobung im Pilotmaßstab, wobei Investitionen in Anlagen im Großmaßstab ausstehen (SANDER et al. 2017a). Neben dem Recycling wird die Wiederverwendung der Magnete als ökologisch und ökonomisch sinnvolle Strategie angesehen (s. a. Tz. 135 ff.; ebd.).

Photovoltaik

57. Photovoltaikmodule lassen sich entsprechend der eingesetzten Zahlen unterscheiden:

- siliziumbasierte Photovoltaikmodule (c-Si-Module), monokristallin und multikristallin;

- Dünnschicht-Photovoltaikmodule, vor allem Cadmium-Tellurid-Module (CdTe-Module), Kupfer-Indium-Disulfid/-Diselenid-Module (CIS-Module), Kupfer-Indium-Gallium-Disulfid/-Diselenid-Module (CIGS-Module) und Kupfer-Indium-Gallium-Selenid-Schwefel-Module (CIGSS-Module). Für Dünnschichtmodule auf Basis von amorphem Silizium (a-Si-Module) wird aufgrund des geringen Wirkungsgrades ein Produktionsende bis 2030 erwartet. Eine weitere Dünnschichttechnologie sind Gallium-Arsenid-Module (GaAs-Module). Diese weisen zwar einen hohen Wirkungsgrad auf, werden wegen ihrer hohen Kosten in der Regel aber nur in Weltraumanwendungen eingesetzt.

Daneben sind weitere Photovoltaiktechnologien, wie Farbstoffsolarzellen und organische Photovoltaikmodule, in Entwicklung (MARSCHEIDER-WEIDEMANN et al. 2016). Weltweit wie auch in Deutschland haben Siliziummodule den größten Marktanteil. Dieser betrug im Jahr 2016 94 % der weltweit installierten Leistung (Fraunhofer ISE 2017b, S. 20). Unter den Dünnschichtmodulen haben CdTe-Module den größten Anteil, gefolgt von CIS- und CIGS-Modulen (ebd.). Die für Photovoltaikmodule verwendeten Rohstoffe und Materialien sind in Abbildung 3-6 dargestellt.

Siliziumbasierte Module bestehen typischerweise zu circa 60 bis 85 % aus Glas (Trägerglas und Deckscheibe), 0 bis 20 % Aluminium (Rahmen), 7 bis 10 % Kunststoffen (insb. EVA-Folie), 3 bis 4 % Solarzellen bzw. 2,5 bis 5 % Silizium, 0,5 bis 1 % Kupfer und 0,05 bis 0,1 % Zinn (WAMBACH et al. 2017; Fraunhofer ISE 2017a). Weiterhin wird Silber (0,5–1 %) als Kontaktmaterial in den Zellen eingesetzt. Hier gibt es aus Kostengründen jedoch Bestrebungen, dies durch Kupfer und/oder Aluminium teilweise oder ganz zu ersetzen (VDMA und SEMI 2017; WECKEND et al. 2016). Weitere eingesetzte Metalle sind Blei und Nickel (mit leicht differierenden Angaben WAMBACH et al. 2017).

Dünnschichtmodule enthalten prinzipiell weniger Material pro installierter Leistung – dabei werden insbesondere dünnere Trägerschichten eingesetzt und die Halbleiter in der Regel direkt auf ein Substrat – meistens Glas – aufgebracht (SEITZ et al. 2013). Als Halbleiter kommen verschiedene Verbindungen zum Einsatz (s. Tz. 57 und Abb. 3-6).

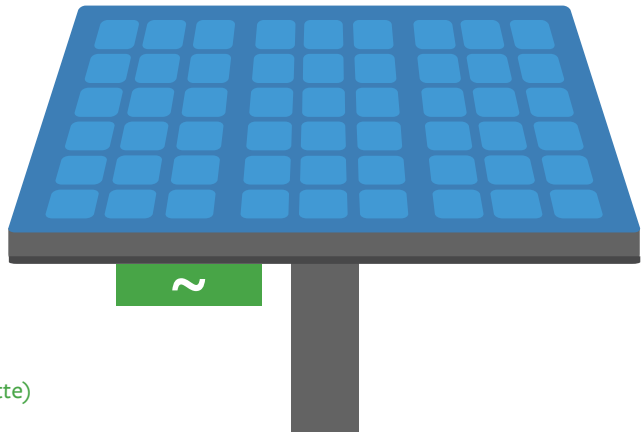
58. In der Praxis fallen – ähnlich wie bei Windkraftanlagen – aufgrund der hohen Lebensdauer von circa dreißig Jahren (WECKEND et al. 2016) bisher nur geringe Mengen an Photovoltaikmodulen zur Verwertung an. Jetzt in die Entsorgung gelangende Module sind in der Regel Produktionsausschüsse oder aufgrund von Witterungsschäden abgebaute Module. Der Stand der Technik der Entsorgung stellt sich wie folgt dar:

- Siliziumbasierte Photovoltaikmodule: Anschlussdosen, Wechselrichter und Kabel werden in der Regel manuell abgetrennt und entsprechenden Recyclingwegen zugeführt. Der Aluminiumrahmen wird teilweise demontiert. Anschließend wird das Modul mechanisch zerkleinert (Schredderprozess). Aluminium und Kupfer werden nachfolgend teilweise abgetrennt und dem Recycling zugeführt. Die Glasfraktion, die aufgrund des starken Verbundes mit dem Halbleitermaterial

Vorabfassung - wird durch die endgültige Fassung ersetzt.

Abbildung 3-6

Rohstoffe und Materialien für Photovoltaikmodule



SRU 2017; Datenquelle: WECKEND et al. 2016; WAMBACH et al. 2017; MARSCHEIDER-WEIDEMANN et al. 2016

und Folien nicht als reine Fraktion gewonnen werden kann, wird zu Glasfasern oder Glasdämmstoffen verarbeitet. Eine stoffliche Verwertung des Halbleitermaterials Silizium findet nicht statt – es gelangt zusammen mit den Kunststoffanteilen in die energetische Verwertung; die Metalle Kupfer, Zink und Blei werden circa zur Hälfte zurückgewonnen, während Silber in der Regel nicht zurückgewonnen wird (SEITZ et al. 2013; WECKEND et al. 2016).

- Dünnschicht-Photovoltaikmodule: In der Praxis wird bisher vor allem ein Verfahren zur Verwertung von CdTe-Modulen in größerem Maßstab eingesetzt. Hierbei werden die Module mechanisch zerkleinert. Unter Zugabe von Säure und Wasserstoffperoxid werden die Halbleiterschichten vom Glas getrennt. Das erzeugte Konzentrat enthält die Halbleitermaterialien, die in einem weiteren Schritt zurückgewonnen werden können. Die Glasfraktion ist nach einer Spülung frei von Halbleiterrückständen und kann rezykliert werden (First Solar 2017). Spezifische Verfahren für das Recycling von a-Si- und CIS-/CIGS-Modulen existieren nicht (SEITZ et al. 2013), jedoch wurde ein Verfahren entwickelt und im Pilotmaßstab umgesetzt, mit dem sämtliche Dünnschichtmodule behandelt werden können. Bei diesem Verfahren werden die Halbleitermaterialien durch Energieeintrag vom Glassubstrat getrennt. Das Glassubstrat, das nun frei von Halbleitermaterialien ist, kann hochwertig wieder in der Flachglasproduktion eingesetzt werden. Die Halbleitermaterialien sowie das enthaltene Silber werden chemisch in Lösung gebracht, woraus sie in hoher Reinheit und Ausbeute zurückgewonnen werden können (SEITZ et al. 2013; PALITZSCH und LOSER 2014).

Bei den bisherigen Ansätzen – insbesondere zur Verwertung von siliziumbasierten Modulen – werden Verfahren aus der Verwertung von laminierten Flachgläsern eingesetzt. Damit können insbesondere die Metalle und Halbleitermaterialien weder vollständig noch hochwertig zu-

Vorabfassung - wird durch die endgültige Fassung ersetzt.

rückgewonnen werden. Spezifische Verfahren, wie ein im kleinen Maßstab erprobter mechanisch-thermischer Prozess, könnten die Rückgewinnung für Metalle erhöhen und das Glas in einer Reinheit bereitstellen, die ein hochwertiges Recycling in der Flachglasindustrie ermöglicht (WAMBACH 2011; 2009). Bei diesem Prozess kann auch das Halbleitermaterial Silizium zurückgewonnen werden (ebd.). Im Bereich der Verwertung von Dünnschicht-Photovoltaikmodulen existieren bisher nur für CdTe-Module Erfahrungen im größeren Maßstab. Für die anderen Dünnschicht-Photovoltaikmodule gibt es im Pilotmaßstab erprobte Ansätze, die ein hochwertiges Recycling zu ermöglichen scheinen.

3.5.2 Netzausbau

59. Zur Anbindung von regenerativen Energieerzeugungsanlagen (Windkraft- und Photovoltaikparks) an das Übertragungsnetz sowie dem Ausbau des Übertragungs- und Verteilnetzes werden Rohstoffe benötigt.

Für die Anbindung an das Übertragungsnetz werden hauptsächlich Kupferkabel verwendet; die notwendige Menge steigt insbesondere bei Offshore-Windparks mit der Entfernung zur Küstenlinie. Nach HARMSEN et al. (2013) sind 95 % des Kupferbedarfs für die Nutzung von Windenergie auf den Netzanschluss zurückzuführen.

60. Bezüglich des Netzausbaus sieht der Netzentwicklungsplan vor, dass bis zum Jahr 2030 zusätzlich zum Startnetz – je nach Szenario – zwischen 7.600 und 8.500 Trassenkilometer um- bzw. ausgebaut werden müssen. Davon entfallen jeweils circa 3.600 km auf den Ausbau (Rest: Stromkreisauflagen und Umbeseilung), wovon wiederum circa 2.400 km als HGÜ-Erdkabel (HGÜ – Hochspannungs-Gleichstrom-Übertragung) geplant sind (50Hertz Transmission et al. 2017). Für die Freilandleitungen werden hauptsächlich Aluminium (Leitung) und Stahl (Masten) benötigt; für unterirdische Kabel Kupfer.

Nicht zuletzt muss das Verteilnetz ausgebaut werden, wobei für Gebäude bereits ein gut ausgebautes Netz besteht, aber zum Beispiel für eine Ladeinfrastruktur für Elektromobilität oder Oberleitungsversorgung von Lkw ein Ausbau noch notwendig ist (vgl. Kap. 5.4).

Bei den verlegten Kabeln ist grundsätzlich von einer hohen Lebensdauer (20–40 Jahre bei Erdkabeln und 80–100 Jahre bei Freileitungen (50Hertz Transmission 2012)) und einer guten Recyclingfähigkeit auszugehen (VDM 2007). Voraussetzung ist der teils sehr aufwendige Rückbau nicht mehr genutzter Freileitungen und Erdkabel.

3.5.3 Speichermedien

61. Strom kann mittels unterschiedlicher technischer Möglichkeiten gespeichert werden. So eignen sich für die Kurzzeitspeicherung (Speicherdauer von Stunden bis zu Tagen zur Lastverschiebung) insbesondere Batterien (Akkumulatoren) und Pumpspeicherkraftwerke (letztere werden hier nicht weiter betrachtet). Für die Langzeitspeicherung (saisonale Speicherung, über Wochen und Monate) kommt vor allem die Herstellung von Wasserstoff inklusive der Rückverstromung infrage.

62. Als Batterie-Kurzzeitspeicher sind prinzipiell Bleiakkumulatoren, verschiedene Lithium-Ionen-Akkumulatoren (Li-Ionen-Akkumulatoren), Natrium-Schwefel-Akkumulatoren, Redox-Flow-Batterien (Speicherung der Energie in Salzen: MARSCHEIDER-WEIDEMANN et al. 2016), Natrium-Schwefel-Akkumulatoren und Zink-Luft-Akkumulatoren geeignet (STAHL et al. 2016). Alle diese Akkumulatortypen benötigen unterschiedliche Rohstoffe in unterschiedlichen Mengenanteilen. Bei den Li-Ionen-Akkumulatoren gehören dazu neben Lithium unter anderem Kobalt, Grafit, Titan, Nickel, Kupfer und Platin; bei den Redox-Flow-Batterien wird neben Grafit und Kupfer bei einem Untertyp Vanadium eingesetzt (ebd.). Für Zink-Luft-Akkumulatoren wird unter anderem Kobalt, Kupfer, Niob und Lanthan benötigt (ebd.; zum Recycling von Li-Ionen-Akkumulatoren s. Abschn. 4.2.2.4). Da sich zum Beispiel Redox-Flow-Batterien noch in der Entwicklung befinden, liegen hier bisher keine Informationen zum tatsächlichen Recycling vor. Die Metalle, die in Lösung vorliegen, können prinzipiell aber nahezu vollständig rezykliert werden (MARSCHEIDER-WEIDEMANN et al. 2016).

Die als Langzeitspeicher geeigneten Brennstoffzellen enthalten als Zellrohstoffe unter anderem die Edel- und Sondermetalle Iridium, Platin, Yttrium, Lanthan sowie Titan, Kupfer und Grafit (STAHL et al. 2016; SANDER et al. 2017a). In der Entsorgungsphase kann davon ausgegangen werden, dass zwar eine verlustfreie Erfassung und anschließende Demontage erfolgen wird, aber die Rückgewinnung insbesondere von Yttrium und Lanthan aus heutiger Sicht unwahrscheinlich ist (SANDER et al. 2017a). Jedoch liegen bisher wenige Kenntnisse zur Entsorgung vor, da bisher keine als Langzeitspeicher verwendeten Brennstoffzellen in das Recycling gelangt sind (ebd.).

Vorabfassung - wird durch die endgültige Fassung ersetzt.

3.5.4 Rohstoffverfügbarkeiten und Rohstoffkonkurrenzen

63. Je schneller der Ausstieg aus der fossilen Energiegewinnung und -nutzung stattfinden soll, desto kurzfristiger müssen die notwendigen alternativen Technologien in den Markt eingeführt werden bzw. den Markt vollständig durchdringen. Wie schnell welche Mengen an welchen Rohstoffen bereitgestellt werden müssen, hängt dabei von den technologischen Ausbaupfaden und der Geschwindigkeit des Ausbaus ab – ein schneller Ausbau bedeutet also kurz- bzw. mittelfristig eine hohe Rohstoffnachfrage. Der Bedarf an Rohstoffen wird dann so lange hoch sein, bis die notwendigen Kapazitäten errichtet sind. Sind die Kapazitäten vollständig aufgebaut, wird der Rohstoffbedarf voraussichtlich wieder zurückgehen.

Konkurrenzen um die Rohstoffe können sowohl bezüglich der Dekarbonisierungstechnologien untereinander, als auch mit anderen Produkten des öffentlichen und privaten Konsums und der Infrastrukturbereitstellung bestehen (ANGERER et al. 2016; HAGELÜKEN 2011). Die gleichzeitige Dekarbonisierung der Sektoren Mobilität, Bau sowie Industrie und Wirtschaft wird eine starke Rohstoffnachfrage auslösen. Dabei ist die Nachfrage entscheidend von der Technologiewahl und der Markdurchdringung abhängig. Beides wird auch dadurch bestimmt, welches Klimaszenario letztendlich erreicht werden soll (World Bank 2017).

64. Der Rohstoffbedarf kann prinzipiell aus zwei Quellen bereitgestellt werden: der Primärgewinnung (Bergbau) und der Sekundärgewinnung (Recycling). Wenn die Nachfrage nach einem Rohstoff ansteigt, führt dies in der Regel zunächst zu höheren Preisen auf dem Markt. Da das Angebot nur zeitverzögert angepasst werden kann (von der Erkundung einer Mine bis hin zum Beginn der Produktion vergehen ca. zehn Jahre), entwickeln die Wirtschaftsakteure Ausweichstrategien, in deren Folge sich der Rohstoffmarkt wieder entspannt (sog. Regelkreis der Rohstoffversorgung (WELLMER und DALHEIMER 2012)). Dabei kann es sich um die Erhöhung der Materialeffizienz, den Einsatz von Substituten, das Ausweichen auf andere Technologien oder die Gewinnung und den Einsatz von Sekundärrohstoffen handeln. Viele der benötigten Rohstoffe können aufgrund der erstmaligen Einführung der Technologien in großen Mengen und ihrer langen Lebensdauer jedoch erst zeitverzögert durch Sekundärrohstoffe bereitgestellt werden.

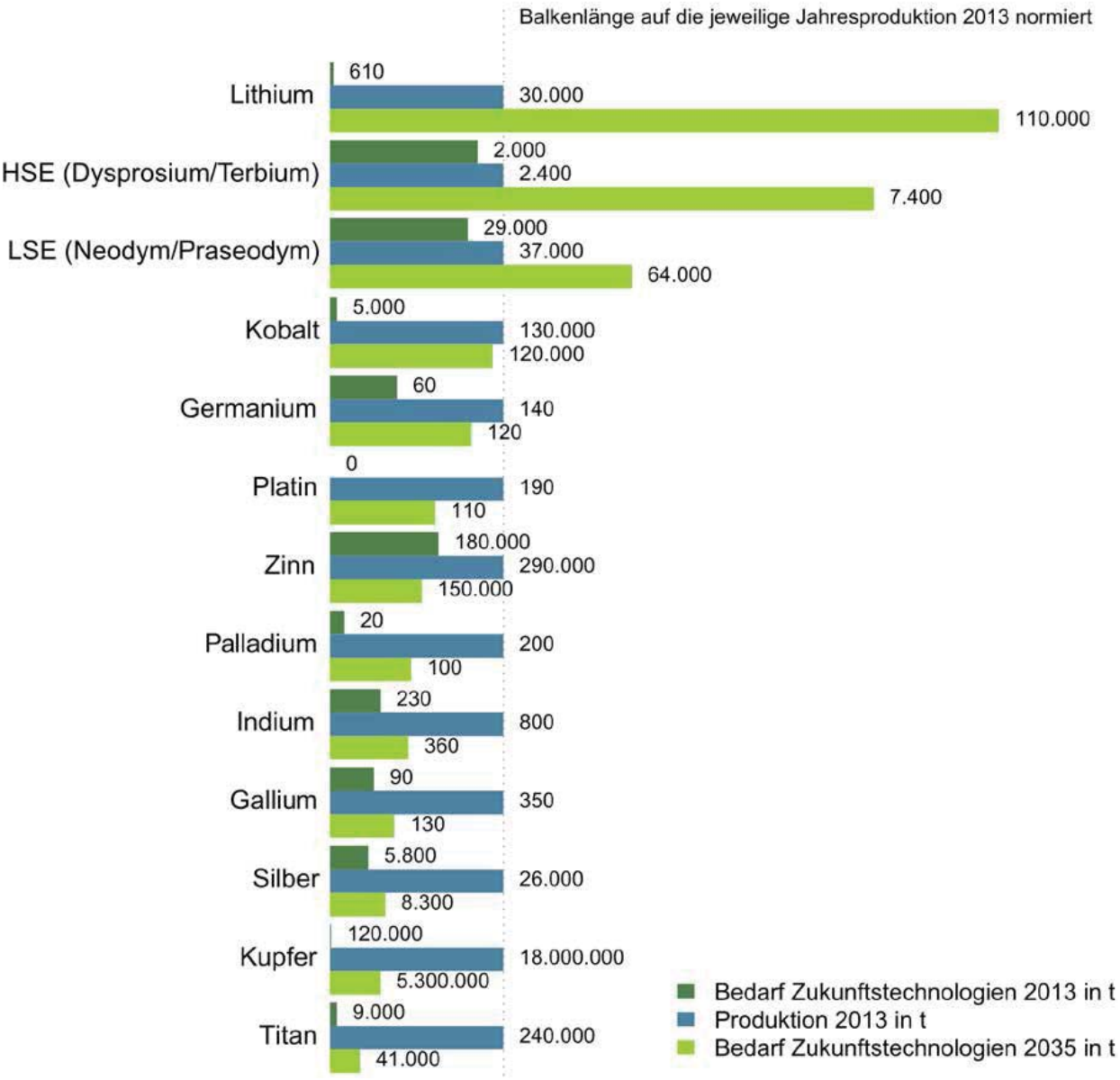
65. Da bezüglich der zukünftigen Technologieentwicklung kaum absehbar ist, wann welche Rohstoffe in welcher Menge benötigt werden (ANGERER et al. 2016; World Bank 2017), ist es schwierig, zukünftige Rohstoffkonkurrenzen und Engpässe zu identifizieren. Jedoch zeigen Schätzungen für ausgewählte rohstoffrelevante Zukunftstechnologien, zum Beispiel in den Bereichen Fahrzeugbau und Antriebstechnik, Energieerzeugung, Informations- und Kommunikationstechnik, dass die zukünftige Nachfrage allein der betrachteten 42 Zukunftstechnologien die derzeitigen Förderkapazitäten für einige Rohstoffe übersteigen kann (s. Abb. 3-7; MARSCHEIDER-WEIDEMANN et al. 2016). Dabei verteilt sich die Nachfrage unterschiedlich auf die betrachteten Zukunftstechnologien.

So entfallen im Status quo (Bezugsjahr 2013) beispielsweise für Lithium nur 2 % der Produktion auf den Bedarf der 42 betrachteten Zukunftstechnologien. Für das Jahr 2035 wird eine Steigerung um das 180fache geschätzt, wobei dieser Bedarf fast ausschließlich auf die Nachfrage für Batterien (Akkumulatoren) von Elektrofahrzeugen zurückgeht. Zu diesem Bedarf im Jahr 2035 kommt die Nachfrage für andere Anwendungen hinzu. Der prognostizierte Bedarf zum Beispiel für Gallium steigert sich hingegen vergleichsweise moderat um das 1,4fache und begründet sich vor allem auf einer gestiegenen Nachfrage nach Hochleistungsmikrochips. Der Bedarf an Gallium für Dünnschicht-Photovoltaik geht gemäß den Prognosen hingegen um 55 % zurück – macht aber immer noch knapp 20 % des prognostizierten Bedarfs aus. Die Steigerung des Platinbedarfs geht auf den Einsatz von Brennstoffzellen zurück. Für den Abgleich mit den bestehenden Förderkapazitäten wäre es hier aber notwendig zu prüfen, ob Mengen durch die Verdrängung von Fahrzeugen mit Verbrennungsmotoren, in deren Katalysatoren Platin eingesetzt wird, „verfügbar“ werden. Ein weiterer relevanter Rohstoff für Stromerzeugungstechnologien ist Indium. Hier kommen die Schätzungen zu dem Ergebnis, dass durch die betrachteten Zukunftstechnologien eine Nachfragesteigerung um das 1,5fache entsteht. Während hier von einer Steigerung der Verwendung von Indiumzinnoxid (indium tin oxide – ITO) in der Displaytechnik ausgegangen wird, wird für die Verwendung in Dünnschicht-Photovoltaik von einer Reduzierung des Bedarfs ausgegangen. Im Jahr 2013 verteilte sich die Nachfrage etwa gleichmäßig auf die beiden Technologien. Für das Jahr 2035 wird davon ausgegangen, dass 76 % der für beide Technologien prognostizierten Nachfrage für ITO auf Displays entfallen (MARSCHEIDER-WEIDEMANN et al. 2016).

Vorabfassung - wird durch die endgültige Fassung ersetzt.

Abbildung 3-7

Bedarf unterschiedlicher Rohstoffe für ausgewählte Zukunftstechnologien (Schätzungen für 2013 und 2035) im Vergleich zur Primärproduktion der jeweiligen Rohstoffe im Jahr 2013



Quelle: MARSCHEIDER-WEIDEMANN et al. 2016, S. 14, überarbeitet

66. Mögliche Nachfragekonkurrenzen zwischen dem Strom- und dem Verkehrssektor könnten weiterhin für die Seltenen Erden auftreten, wobei die globale Betrachtung durch MARSCHEIDER-WEIDEMANN et al. (2016) zeigen, dass die benötigte Menge an Seltenen Erden je nach Ausbaugrad der Windenergie und Anteil der permanentmagnetisch erregten Generatoren stark variiert (s. Abschn. 3.5.1). Demnach liegt der globale Bedarf an Dysprosium für Windkraftanlagen im Jahr 2035 bei 130 bis 1.170 t. Das entspricht 5,6 bzw. 50,2 % der Produktionsmenge in 2013. Da für Windkraftanlagen auch Technologien zur Verfügung stehen, für die keine Seltenen Erden benötigt werden, ist es bei Engpässen möglich, auf diese auszuweichen (ebd.). Ebenso wäre dies bei Elektrofahrzeugen möglich – auch hier gibt es Modelle, die Motoren ohne Permanentmagnete verwenden. Der von MARSCHEIDER-WEIDEMANN

Vorabfassung - wird durch die endgültige Fassung ersetzt.

et al. (ebd.) geschätzte globale Bedarf an Dysprosium und Terbium im Jahr 2035 liegt zwischen 260 und 9.800 t. Ein Vergleich der potenziellen Bedarfe für Elektrofahrzeuge, Windkraftanlagen, E-Bikes und anderen Anwendungen zeigt, dass von Elektrofahrzeugen voraussichtlich die höchste Nachfrage ausgehen wird (ebd.).

Eine Besonderheit ergibt sich für Metalle, die in Koppelproduktion gewonnen werden: Die Gewinnung des Hauptmetalls wird nicht ausgebaut werden, um die Produktion des Nebenmetalls zu vergrößern und andersherum wird die Produktion des Hauptmetalls nicht verringert werden, wenn der Bedarf an Nebenmetall durch verstärktes Nebenmetallrecycling zurückgeht. Beispiele sind die Gewinnung von Indium, Germanium und Tellur (Hauptmetalle: Kupfer und Zink (ELSHKAKI und GRAEDEL 2015)) sowie Selen (VIEBAHN et al. 2014). Bei der Gewinnung von Dysprosium kann es zu einem Überangebot an Neodym, Lanthan, Cer und Yttrium kommen (ELSHKAKI und GRAEDEL 2014). Ein Überangebot an den Hauptmetallen bzw. koproduzierten Metallen könnte infolge von sinkenden Preisen zu geringeren Recyclingaktivitäten für diese Metalle führen (ELSHKAKI und GRAEDEL 2015).

67. Bezüglich der Versorgungssicherheit der EU haben BLAGOEVA et al. (2016) Szenarien mit und ohne Anpassungsmaßnahmen wie Substitution und Recycling betrachtet. Werden keine Anpassungsmaßnahmen getroffen, werden für Windkraftanlagen Dysprosium, Neodym und Praseodym, für Photovoltaikmodule Indium und Silber und für Elektrofahrzeuge Neodym, Praseodym, Dysprosium, Kobalt, Grafit und Lithium als stark kritisch eingestuft. Mit Anpassungsmaßnahmen werden die aufgeführten Rohstoffe bis auf Neodym, Praseodym und Lithium für Elektrofahrzeuge nur noch mit einer mittleren Kritikalität bewertet. Als unkritisch aus Versorgungssicht werden Selen, Cadmium, Kupfer, Gallium und Tellur bewertet (ebd.).

In jedem Fall – auch bei Ausweichen auf Alternativtechnologien, Erhöhung der Materialeffizienzen, Substitution von Rohstoffen und Einführen hochwertiger Recyclingsysteme – wird eine Erhöhung der Produktionsmengen erforderlich sein, um den weltweiten Bedarf zu decken. Dabei zeigt der dargestellte Stand der Technik des Recyclings, dass Technologien, die ein hochwertiges Recycling ermöglichen, teilweise noch entwickelt bzw. im Großmaßstab umgesetzt werden müssen. Die Hochwertigkeit und eine hohe Recyclingeffizienz sind dabei wesentlich, um mittel- und langfristig tatsächlich zur Rohstoffversorgung beitragen zu können Die kurz- bis mittelfristig absehbare Erhöhung der Produktionsmengen wird zwangsläufig erst einmal zu einem höheren Druck auf die Umwelt führen, was im jetzigen System der Angebots- und Nachfragedynamik jedoch nicht als limitierender Faktor wirkt bzw. berücksichtigt wird.

3.6 Implikationen für die Dekarbonisierung des Verkehrs

68. Die vorliegende Analyse zeigt, dass der Bedarf an erneuerbarem Strom in allen Sektoren deutlich ansteigen wird. Mit Blick auf das begrenzte Angebot günstiger Standorte und damit einhergehender steigender Grenzkosten der Stromerzeugung ist grundsätzlich ein möglichst effizienter Umgang auch mit Strom aus erneuerbaren Quellen geboten. Dieses Gebot ist jedoch in Balance zu bringen mit der gleichzeitigen Anforderung einer möglichst flexiblen Nachfrage, die auf Fluktuationen im Stromangebot reagieren kann. Dies ist bei der Wahl der Dekarbonisierungspfade in den verschiedenen Sektoren und deren intersektoraler Abstimmung zu berücksichtigen.

69. Im Gebäudewärmesektor ist eine weitreichende direkte Nutzung von Strom in Wärmepumpen wahrscheinlich. Dies ermöglicht im Zusammenspiel mit Wärmespeichern kurzfristige Flexibilität. Die direkte Nutzung von Strom im Industriesektor zur Erzeugung von Hochtemperaturwärme ist hingegen wenig flexibel und steigt voraussichtlich in Zukunft weiter an. Zusätzlich besteht vor allem in der Industrie ein hoher Bedarf an synthetischen Energieträgern und Biomasse für nicht elektrifizierbare Prozesse, welche allerdings langfristig die Flexibilität des Energiesystems erhöhen. Mithin besteht bei der Stromversorgung lediglich in Ausnahmefällen – längeren Perioden mit niedriger erneuerbarer Einspeisung (sog. „Dunkelflaute“) – eine potenzielle Versorgungsproblematik. Ohne den Einsatz synthetischer Brennstoffe wären zur Aufrechterhaltung der Stromversorgung hohe Überkapazitäten in der Stromerzeugung notwendig, um auch in diesen seltenen Ausnahmefällen ein ausreichendes Stromangebot bereitzustellen. Das Vorhalten solcher Überkapazitäten würde die durchschnittlichen Stromerzeugungskosten allerdings stark ansteigen lassen. Würde stattdessen in Zeiten niedriger erneuerbarer Einspeisung – in flexibel steuerbaren Kraftwerken – aus saisonal gespeicherten synthetischen Brennstoffen Strom und Wärme erzeugt, könnte mit deutlich geringeren Erzeugungskapazitäten Versorgungssicherheit gewähr-

Vorabfassung - wird durch die endgültige Fassung ersetzt.

leistet werden. Da in Zeiten einer „Dunkelflaute“ Strom- und Wärmeversorgung in der Regel zeitgleich einer Versorgungsproblematik unterliegen, kann die Nutzung synthetischer Brennstoffe in KWK-Anlagen (Kraft-Wärme-Kopplung – KWK) besonders effizient sein, da der Energiegehalt der Brennstoffe fast vollständig in Nutzenergie umgewandelt wird.

70. Die Flexibilität und Speicherbarkeit synthetischer Energieträger kann somit für den Stromsektor – in Ausnahmesituationen – einen großen gesamtsystemischen Nutzen haben. Im Verkehrsbereich, insbesondere im Pkw-Segment, scheint der (großflächige) Einsatz synthetischer Kraftstoffe gesamtsystemisch hingegen wenig sinnvoll. Aufgrund des geringen Gesamtwirkungsgrads würde sich hierdurch ein wesentlich höherer Primärenergiebedarf ergeben (s. Abb. 4-16). Mit einem entsprechend höheren Zubau an erneuerbaren Stromerzeugungskapazitäten sind negative Auswirkungen auf ökologische Schutzgüter wie Fläche, Biodiversität und Landschaftsbild zu erwarten. Auch zur Sicherung der gesellschaftlichen Akzeptanz des Transformationsprozesses ist es daher sinnvoll, auf den unnötigen Einsatz synthetischer Kraftstoffe zu verzichten. Dies könnte zu stark steigenden Stromerzeugungskosten führen. Von deutlich höheren Kosten für diesen Dekarbonisierungspfad ist auch deshalb auszugehen, weil aufgrund hoher Investitionskosten ein Einsatz von Power-to-Liquid- oder Power-to-Gas-Technologien vermutlich nur in Stunden mit einem Überangebot aus erneuerbaren Energien wirtschaftlich darstellbar sein wird. Hier besteht ein Zielkonflikt zwischen systemdienlicher, flexibler Herstellung synthetischer Brennstoffe und einer – die Fixkosten je produzierter Energieeinheit senkenden – hohen Auslastung.

71. Dennoch sollten auch im Verkehrssektor kostengünstig und gesamtsystemisch sinnvoll zu erschließende Flexibilitätsoptionen genutzt werden. Hier ist beispielsweise das gesteuerte, an gesamtsystemischen Erfordernissen orientierte Laden von Elektrofahrzeugen zu nennen, wodurch der Verkehrssektor einen Beitrag zur kurzfristigen Lastglättung leisten kann: Elektrofahrzeuge sollten insbesondere dann geladen werden, wenn das Angebot erneuerbaren Stroms relativ (d. h. im Vergleich zur aktuellen Nachfrage) groß ist. Bei ungesteuertem Laden eines Großteils der elektrischen Fahrzeugflotte würde der Verkehrssektor hingegen den Flexibilitätsbedarf in den anderen Sektoren stark erhöhen.

Neben der Wahl der Antriebstechnologie und des korrespondierenden Energieträgers kann der Verkehrssektor überdies einen wichtigen Beitrag zur Entlastung der Energieversorgung – sowie der Umwelt insgesamt – leisten, indem er die vorhanden Potenziale zur Vermeidung und Verlagerung konsequent erschließt. Verkehre, die auf energieeffiziente Verkehrsträger verlagert oder gleich ganz vermieden werden, entschärfen den Wettbewerb um knappe erneuerbare Energien, die zudem auch nicht frei von direkten und indirekten Umweltbelastungen sind.

Vorabfassung - wird durch die endgültige Fassung ersetzt.

Vorabfassung - wird durch die endgültige Fassung ersetzt.

Vorabfassung - wird durch die endgültige Fassung ersetzt.

4 Klimaschutz und Transformation des Verkehrssektors

Die Treibhausgasemissionen des Verkehrssektors sind seit 1990 nicht gesunken. Effizienzgewinne wurden durch die gestiegene Verkehrsleistung, vor allem des Güterverkehrs, zunichte gemacht. Es besteht deshalb dringender Handlungsbedarf zur Minderung sektorspezifischer Treibhausgasemissionen. Insbesondere muss schnellstmöglich ein Umstieg auf alternative Antriebe erfolgen; im Straßenverkehr ist die Elektromobilität zu forcieren. Im Sinne einer nachhaltigen Lösung müssen Gewinnung und Kreislaufführung der dafür erforderlichen Rohstoffe zukunftsfähig gestaltet werden. Daneben muss auch der Energieverbrauch des motorisierten Verkehrs je Fahrzeugkilometer weiterhin deutlich gesenkt werden, vor allem durch fahrzeugseitige Effizienzmaßnahmen. Vermeidung und Verlagerung von Verkehren schließlich tragen nicht nur zur Dekarbonisierung des Verkehrssektors, sondern auch zur Verringerung seiner sonstigen Umwelt- und Gesundheitsbelastungen bei.

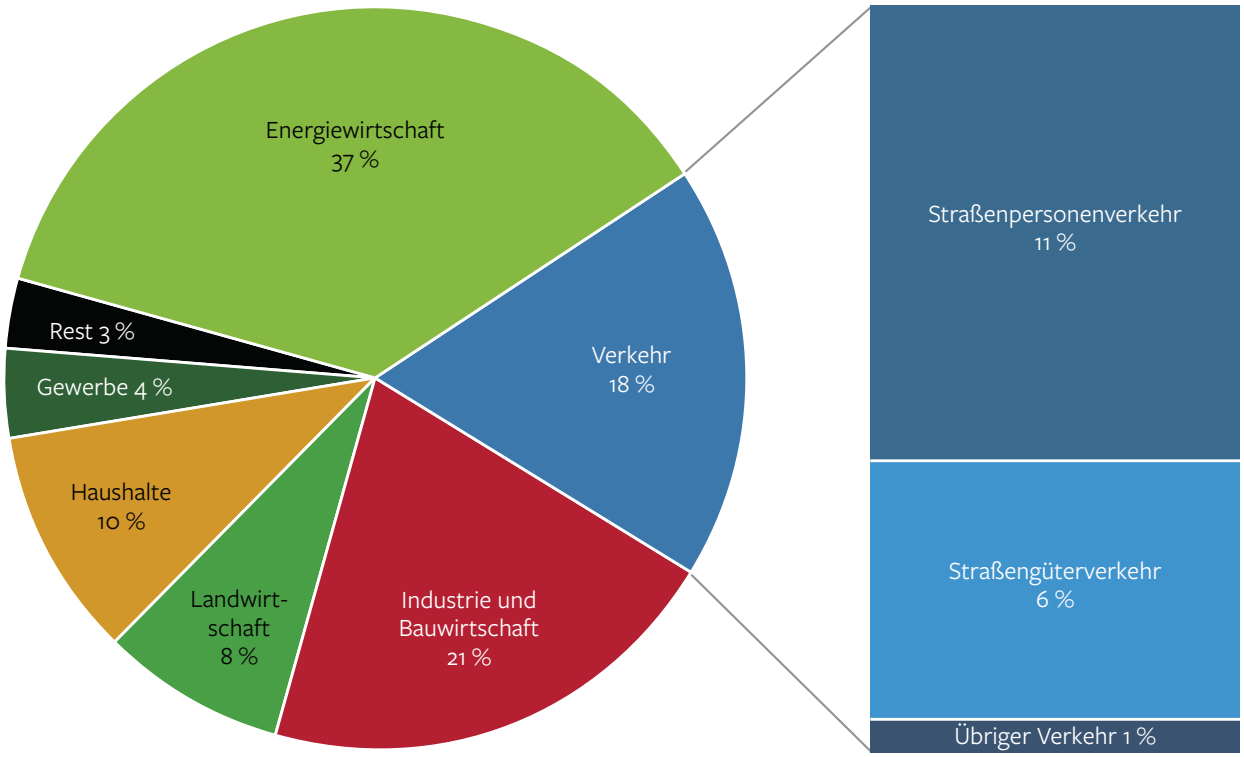
4.1 Ausgangslage Verkehr

72. Der Verkehrssektor war im Jahr 2016 direkt für 18 % der Treibhausgasemissionen Deutschlands verantwortlich; indirekte Emissionen (z. B. des Bahnstroms) und die Emissionen des internationalen Luft- und Schiffsverkehrs, sind hier nicht berücksichtigt (Abb. 4-1; UBA 2017c). Während in anderen Sektoren seit 1990 zum Teil deutliche Emissionsminderungen erzielt wurden, lagen die Verkehrsemissionen im Jahr 2016 mit 166 t CO_{2eq} sogar leicht oberhalb derer des Jahres 1990 mit 163 t CO_{2eq} (BMUB 2016c, S. 47). 95 % der direkten Treibhausgasemissionen des Verkehrs verursacht der Straßenverkehr. Der Schwerpunkt der folgenden Ausführungen liegt auf den Teilbereichen des Verkehrs, in denen Verbrennungsmotoren CO_2-Emissionen verursachen.

Die mangelnde Reduktion sektoraler Treibhausgasemissionen ist vor allem eine Folge des zunehmenden Verkehrs: Zwar ist im Verkehrssektor der spezifische Endenergieverbrauch in Personenkilometern (Pkm) und Tonnenkilometern (tkm) insbesondere aufgrund technischer Verbesserungen an den Fahrzeugen gesunken (um rund 10 % seit 2005 (BMUB 2016c, S. 47)). Diese Einsparungen wurden aber durch den deutlichen Anstieg der Verkehrsleistung im Personen- und Güterverkehr sowie durch die Zunahme der durchschnittlichen Motorenleistung und des Gewichts von Pkw aufgezehrt. So hat sich seit Beginn der 1960er-Jahre die Verkehrsleistung im Personenverkehr etwa vervierfacht (IFEU 2016, S. 26). Damit stieg im Ergebnis auch der absolute Endenergieverbrauch des Verkehrs. Überwiegender Verursacher ist der motorisierte Individualverkehr (MIV), der für gut drei Viertel der Verkehrsleistung im Personenverkehr verantwortlich ist (Stand: 2010) (BVU et al. 2014, S. 216).

Abbildung 4-1

Sektorale Treibhausgasemissionen Deutschlands im Jahr 2015*



*Der internationale Luftverkehr wird hier nicht abgebildet.

SRU 2017; Datenquelle: EEA 2017

Beim Personenverkehr (Abb. 4-2) wie beim Güterverkehr dominiert der Straßenverkehr ganz deutlich.

73. Wenn die Klimaschutzziele der Bundesregierung erreicht werden sollen, muss der Verkehr bis 2050 weitestgehend treibhausgasneutral sein. Dies gilt auch mit Blick auf die nach dem Klimaabkommen von Paris gebotene Gesamtminderung der Treibhausgasemissionen um 95 %. Der Klimaschutzplan 2050 der Bundesregierung sieht bis 2030 eine Minderung gegenüber 1990 um 40 bis 42 % und bis zum Jahr 2050 eine weitgehende Dekarbonisierung des Verkehrs vor, ohne jedoch das letztere Ziel zu präzisieren (BMUB 2016c, S. 26).

74. Mobilität ist für das Leben und Wirtschaften der Gesellschaft von großer Relevanz. Zugleich bedeutet Mobilität in Deutschland in erster Linie Automobilität: der Bestand an Kraftfahrzeugen und Anhängern belief sich am 1. Januar 2016 auf rund 61,5 Mio., darunter rund 45,1 Mio. Pkw (BMVI 2016e, S. 4). Die Pkw-Zulassungszahlen sind über Jahrzehnte angestiegen und verharren auf hohem Niveau (Abb. 4-3). Die in der Abbildung sichtbare Spitze der Neuzulassungen 2009 spiegelt die Wirtschafts- und Finanzkrise 2007/2008, in deren Verlauf zunächst deutlich weniger Fahrzeuge zugelassen wurden. Mit der 2009 eingeführten Abwrackprämie für die Stilllegung eines Altfahrzeuges beim Kauf eines Neuwagens stiegen die Pkw-Zulassungszahlen dann wieder kurzzeitig und vorübergehend erheblich an.

4.1.1 Umwelt- und Gesundheitsauswirkungen des Verkehrs

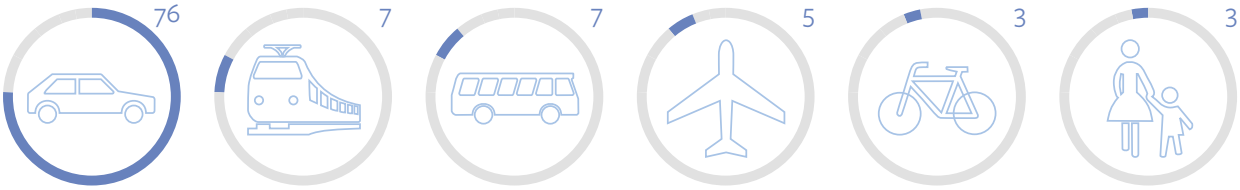
75. Insbesondere der motorisierte Straßenverkehr bringt zahlreiche negative Auswirkungen auf die Umwelt und die menschliche Gesundheit mit sich (zu den Umweltwirkungen des Schiffsverkehrs vgl. Tz. 90). Problematisch sind neben den Treibhausgasemissionen in Form von Kohlenstoffdioxid (CO_2) vor allem die Emissionen der Schadstoffe Stickstoffoxide (NO_x), Feinstaub und flüchtige organische Verbindungen ohne Methan (NMVOC). Kohlenmonoxid und Schwefeldioxid spielen

Vorabfassung - wird durch die endgültige Fassung ersetzt.

Abbildung 4-2

Personenverkehr nach Verkehrsmodus

Anteil an Beförderungsleistung in %



Quelle: Statistisches Bundesamt 2013, S. 7 (für das Jahr 2010)

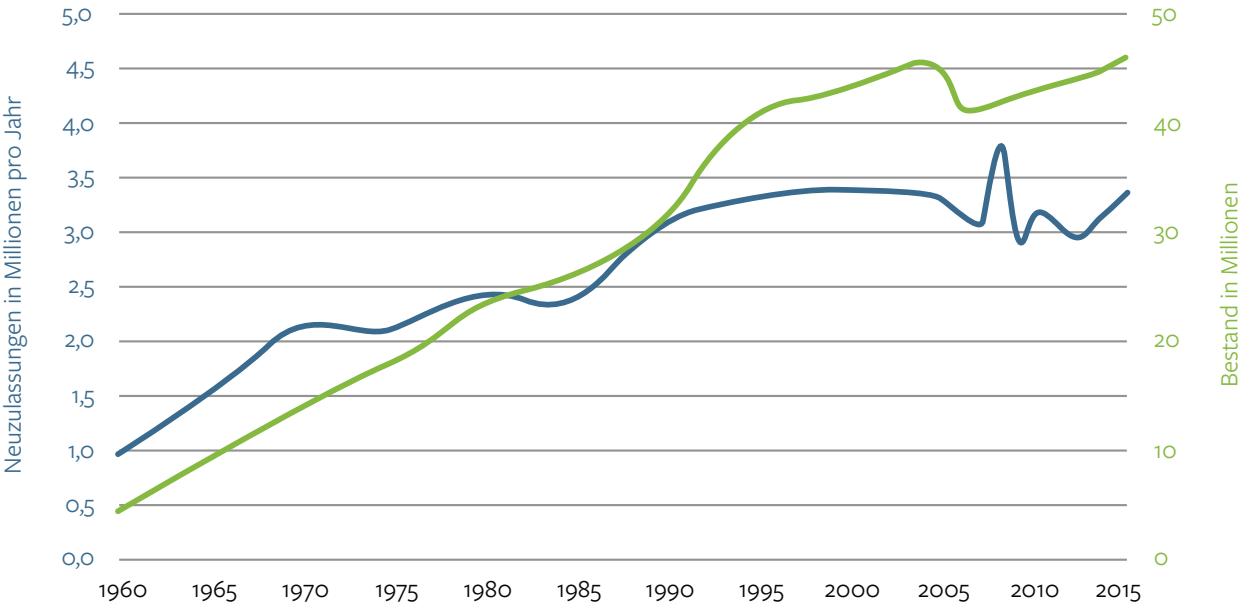
dagegen heute nur noch eine untergeordnete Rolle. Weitere negative Wirkungen des Verkehrs entstehen durch Lärmemissionen und Flächenverbrauch. Neben den Gesundheitsfolgen aufgrund der genannten Emissionen stirbt nach wie vor eine große Anzahl von Menschen durch Verkehrsunfälle.

Der Verkehr ist mit etwa 38 % (im Jahr 2015) die Hauptquelle für anthropogen verursachtes NO_x (UBA 2017b). Besonders problematisch sind nach wie vor die hohen Stickstoffdioxidkonzentrationen in den Städten. Die höchsten NO_x-Belastungen treten an stark vom Verkehr geprägten Standorten mit durchlüftungshemmender Baustruktur auf. So wurde auch im Jahr 2016 der Jahresgrenzwert der Luftqualitätsrichtlinie 2008/50/EG zum Schutz der menschlichen Gesundheit von 40 µg/m³ Stickstoffdioxid an deutlich mehr als der Hälfte (ca. 57 %) der verkehrsnahen Messstationen überschritten (UBA 2017f). Hohe Stickstoffdioxidkonzentrationen stellen eine besondere Gesundheitsbelastung für empfindliche Bevölkerungsgruppen wie Kinder oder Personen mit Atemwegserkrankungen (z. B. Asthma bronchiale, chronische Bronchitis) dar (LANUV NRW 2010; KEHE und EYER 2013; KRAFT et al. 2005). Außerdem sind NO_x und NMVOC Vorläufersubstanzen für bodennahes Ozon, erstere auch für Feinstaub (sog. Sekundärpartikel; s. a. SRU 2017).

Auch die Feinstaubbelastung wird sehr stark durch den Straßenverkehr als einem der Hauptverursacher be-

Abbildung 4-3

Zulassungen und Bestand von Pkw von 1960 bis heute



SRU 2017; Datenquelle: KBA 2017a; 2017c

Vorabfassung - wird durch die endgültige Fassung ersetzt.

stimmt. Feinstaub tritt in besonders hohen Konzentrationen im verkehrsnahen Raum auf. Die Partikel entstehen im Verbrennungsprozess, wobei Dieselfahrzeuge besonders viele Partikel emittieren, sowie aus dem Reifen- und Bremsabrieb. Im Jahr 2016 wurde der Kurzzeitgrenzwert (24 h) von 50 µg/m³ PM_{10} an etwa 1 % der städtischen verkehrsnahen Messstellen öfter als die nach Europarecht zulässigen 35-mal überschritten (UBA 2017f). Die Weltgesundheitsorganisation (World Health Organization – WHO) empfiehlt im Unterschied zur europäischen Vorgabe nur drei zulässige Überschreitungen pro Jahr, was bei 46 % der genannten Messstellen zur Nichteinhaltung führen würde (WHO 2006; UBA 2017f). Partikel wie Dieselruß weisen eine besonders hohe gesundheitsschädliche Wirkung auf. Für diese Wirkung spielen reaktive Bestandteile der Partikel sowie die Partikelanzahl und die Partikelgröße eine besondere Rolle. Je kleiner die Partikel sind, desto tiefer können sie in die Lunge eindringen. Ultrafeine Partikel (aerodynamischer Durchmesser < 0,1 µm) können bis in die Blutgefäße und über diese in andere Organe gelangen. Die Feinstaubbelastung ist eine Ursache für Atemwegs- und Herz-Kreislauf-Erkrankungen (BEELEN et al. 2008; HOEK et al. 2013; RAASCHOU-NIELSEN et al. 2013; HORNBERG et al. 2013).

76. Der Straßenverkehr ist die bedeutendste Lärmquelle überhaupt: knapp die Hälfte der Menschen fühlt sich in ihrem Wohnumfeld durch Straßenverkehrslärm belästigt (BMUB und UBA 2017, S. 51). Dies gilt vor allem in Städten, wo ein erheblicher Anteil der Bevölkerung hohen Lärmbelastungen ausgesetzt ist (UBA 2016a; MIELCK 2004). So waren im Jahr 2012 etwa 2,5 Mio. Menschen in Deutschland Straßenverkehrslärmimmissionen im Tagesmittel über dem Schwellenwert des Tag-Abend-Nacht-Lärmindexes von 65 dB(A) ausgesetzt. Nachts waren circa 2,9 Mio. Menschen in Deutschland von Verkehrslärm oberhalb des Nacht-Lärmindexes von 55 dB(A) betroffen (UBA 2017a). Bei Lärmimmissionen oberhalb der beiden genannten Werte steigt nachweislich das Risiko für Herz-Kreislauf-Erkrankungen. Aber auch bei geringen Werten sind Beeinträchtigungen, beispielsweise Schlafstörungen in der Nacht, für den Menschen zu erwarten. Die WHO empfiehlt, dass die Lärmbelastung nachts 40 dB(A) im zeitlich gemittelten Schallpegel (Mittelungspegel) nicht überschreiten soll (WHO 2009).

77. Dem Straßenverkehr fallen nach wie vor viele Menschenleben zum Opfer. Die Straßenverkehrssicherheit hat seit den 1970er-Jahren zwar deutlich zugenommen. Im Jahr 2016 sind aber noch immer 3.206 Menschen auf Deutschlands Straßen bei Verkehrsunfällen getötet worden (Statistisches Bundesamt 2017a, S. 609). In den ersten sechs Monaten des Jahres 2017 ist die Zahl der Verkehrstoten in Deutschland außerdem wieder gestiegen. Von Januar bis Ende Juni 2017 starben nach Angaben des Statistischen Bundesamts insgesamt 1.536 Menschen bei Unfällen auf deutschen Straßen. Das waren 90 Menschen oder 6,2 % mehr als im ersten Halbjahr 2016 („1. Halbjahr 2017: 6,2 % mehr Verkehrstote im Straßenverkehr“, Pressemitteilung des Statistischen Bundesamtes vom 22.08.2017).

78. Der Verkehr nimmt erhebliche Flächen in Anspruch: So benötigt der fließende Pkw-Verkehr im Vergleich zum Rad- und Fußgängerverkehr etwa fünf- bis zehnmal so viel Fläche (s. SRU 2012, Tz. 291). Da ein Fahrzeug im Schnitt mehr als 23 Stunden am Tag steht, dominieren abgestellte Pkw das Erscheinungsbild der Städte und belegen Flächen, die für andere Nutzungen nicht zur Verfügung stehen. Die hohe Inanspruchnahme von Flächen durch den ruhenden und fließenden Verkehr belässt zudem wenig Aufenthaltsraum für freizeitliche Nutzung, führt zu eingeschränkten Bewegungsmöglichkeiten und behindert soziale Interaktionen. Dies betrifft besonders Kinder, ältere Menschen und in ihrer Mobilität eingeschränkte Personen. Weiterhin kann die Nutzung des Pkw zu einer geringeren körperlichen Aktivität und damit verbundenen Erkrankungen bei den Autofahrerinnen und Autofahrern führen (ausführlich zu den Umwelt- und Gesundheitsfolgen: SRU 2012, Tz. 291–301).

79. Die genannten Belastungen für den Menschen durch den Straßenverkehr sind zwischen den Bevölkerungsgruppen ungleich verteilt. So sind oftmals einkommensschwache Haushalte in stärkerem Maße von Luft- und Lärmbelastungen sowie dem Fehlen von qualitativ hochwertigen Freiflächen betroffen (HORNBERG und PAULI 2009; GOTTSCHALK et al. 2011; LAUßMANN et al. 2013). Gleichzeitig verfügen diese Bevölkerungsgruppen über geringere Möglichkeiten zur Expositionsvermeidung oder zum Umgang bzw. zur Anpassung mit den assoziierten gesundheitlichen Belastungen (KÖCKLER und HORNBERG 2012).

80. Der Verkehr hat auch negative Auswirkungen auf Landschaft und Biodiversität. Der Bau von Verkehrsflächen führt in der Landschaft zu einem Verlust an Lebensräumen für Pflanzen und Tiere sowie zu einer Fragmentierung von Habitaten. Verkehrswege bilden Barrieren, die Wanderungsbewegungen von Wildtieren verhindern. Die Folgen reichen bis hin zur Isolierung bzw. Verinselung von Populationen, welche zu einer

Vorabfassung - wird durch die endgültige Fassung ersetzt.

genetischen Verarmung führt (vgl. SRU 2005, Tz. 42 ff.; zu den Folgen der Landschaftszerschneidung: SRU 2016a, Tab. 4-1). Außerdem ist der Verkehr einer der Hauptemittenten von NO_x, die zur Eutrophierung von terrestrischen und aquatischen Ökosystemen beitragen (SRU 2015b, Tz. 85 ff.).

4.1.2 Verkehrsleistung

81. Ungeachtet der negativen Auswirkungen des Verkehrs steigt die Verkehrsleistung in Deutschland stetig an. Nachfolgend sollen daher zunächst im Überblick einige Kennziffern zur Verkehrsentwicklung in Deutschland dargestellt werden. Im Personenverkehr wächst die Verkehrsleistung seit Jahren, von 1999 bis 2012 um rund 7 % (UBA 2015a, S. 109). Als Verkehrsleistung wird das Produkt aus dem jährlichen Verkehrsaufkommen reisender Personen (Anzahl) bzw. transportierter Güter (in t) und der Länge der zurückgelegten Wegstrecke (in km) bezeichnet. Sie wird entsprechend in Pkm bzw. in tkm gemessen.

Das Wachstum der Verkehrsleistung resultiert in erster Linie aus steigenden Längen der zurückgelegten Strecken. Seit 1982 ist die durchschnittliche Wegelänge von 10 km auf 12,3 km pro Weg im Jahr 2014 gestiegen (WEIß et al. 2016, S. 114). Eine der Ursachen dafür ist, dass Menschen über längere Strecken zur Arbeit fahren. Darüber hinaus pendeln mehr Menschen zu ihrer Arbeit: Dem Bundesinstitut für Bau- Stadt- und Raumforschung (BBSR) zufolge pendelten 2016 bereits 60 % aller Arbeitnehmerinnen und Arbeitnehmer, während es 2000 noch 53 % waren (BBSR 2017). Die Anzahl der Wege pro Person und Tag sowie die Zeit, die dafür aufgewendet wird, sind dagegen gleich geblieben. Hierbei handelt es sich um keine neue Erkenntnis: Menschen in verschiedenen Ländern und Kulturen sind über Jahrzehnte hinweg durchschnittlich täglich die gleiche Zeit unterwegs. Dieses konstante Reisezeitbudget gilt als eine der stabilsten Mobilitätskenngrößen und wird als „Marchetti-Konstante“ bezeichnet (MARCHETTI 1994; METZ 2008).

Auch im Urlaubsverkehr legen die Deutschen weitere Strecken als früher zurück. Allerdings hat sich diese Entwicklung im Straßenpersonenverkehr etwas abgeschwächt. Anders ist es jedoch im Luftverkehr, dessen Verkehrsleistung aufgrund gestiegener Fluggastzahlen und längerer Distanzen weiterhin erheblich wächst (vgl. Tz. 92 f.).

Die in tkm gemessene inländische Güterverkehrsleistung stieg von 1999 bis 2012 um 27,4 % und damit deutlich stärker als die Personenverkehrsleistung (UBA 2015a, S. 106). Verantwortlich dafür ist in erster Linie eine stärkere überregionale wirtschaftliche Verflechtung, die sich in längeren Transportwegen äußert. Daneben können auch veränderte Konsumgewohnheiten wie die Zunahme des Internethandels zu diesem Anstieg beigetragen haben.

4.1.3 Energieverbrauch

82. Ein steigender Energieverbrauch im Verkehrssektor macht die Energiewende insgesamt ineffizienter, ressourcenintensiver und damit auch unwirtschaftlicher (BERGK et al. 2017, S. 18). Daher wächst der Energieverbrauch des Verkehrssektors weiter: 2013 betrug sein gesamter Primärenergieverbrauch 3.293 PJ, das entspricht einem knappen Viertel (24 %) des gesamten Primärenergieverbrauchs in Deutschland. Als Primärenergieverbrauch bezeichnet man den Energiegehalt aller im Inland eingesetzten Energieträger. Er umfasst sogenannte Primärenergieträger, wie zum Beispiel Braun- und Steinkohle, Mineralöl oder Erdgas, die entweder direkt genutzt oder in sogenannte Sekundärenergieträger, wie zum Beispiel Kraftstoffe oder Strom, umgewandelt werden.

Endenergie ist der nach Energiewandlungs- und Übertragungsverlusten verbleibende, nutzbare Teil der Primärenergie. Der Verkehr weist unter allen Sektoren Deutschlands den höchsten Endenergieverbrauch auf. Er ist noch weit von den Zielen der Bundesregierung entfernt (Abb. 4-4).

Die Divergenz zwischen Zielen und realer Entwicklung spiegelt sich auch in einem Anstieg des absoluten Energieverbrauchs zwischen 1995 und 2013 um 30 % im Güterverkehr (von 759 auf 984 PJ) und um 3 % im Personenverkehr (von 2.238 auf 2.309 PJ) wider (AGEB 2016). Der Straßenverkehr hat den mit Abstand höchsten Endenergieverbrauch aller Modi, was sowohl aus seinem großem Anteil an der gesamten Verkehrsleistung, als auch dem hohen spezifischen Energieverbrauch pro Verkehrsleistungseinheit.

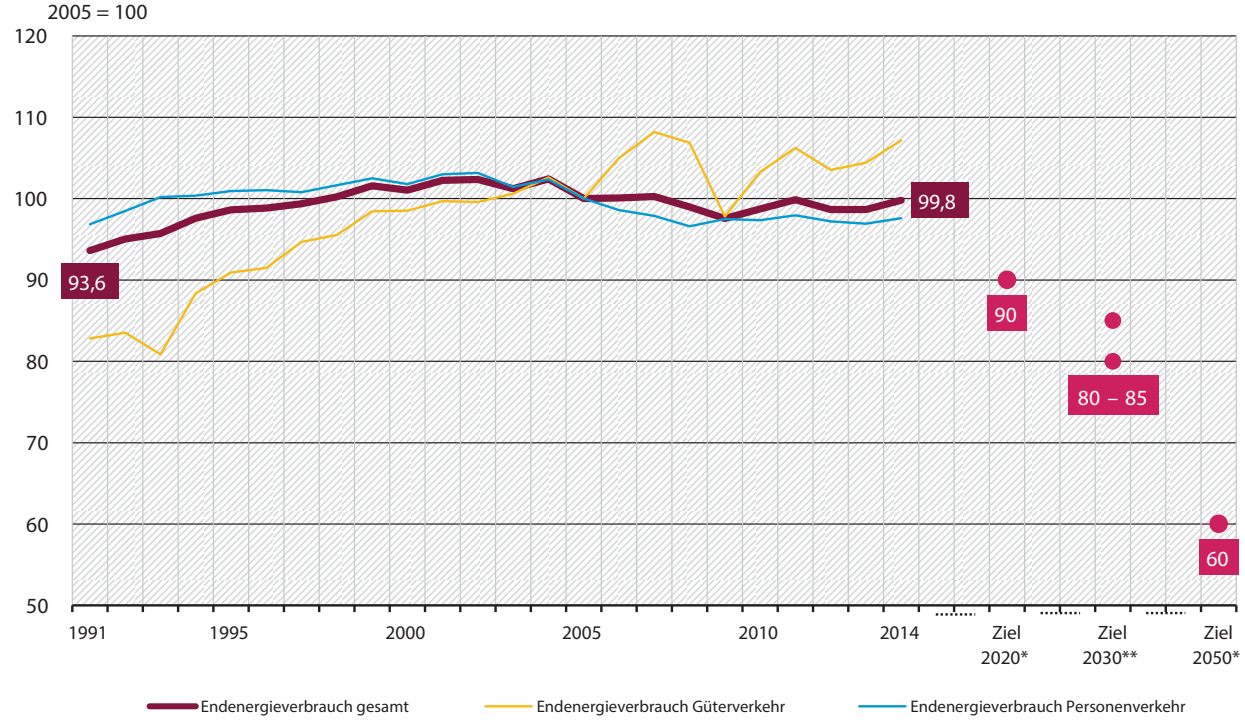
4.1.4 Treibhausgasemissionen

83. Im Jahr 2015 entsprachen die Emissionen des Verkehrssektors von 160,8 Mio. t CO_{2eq} 18 % der gesamten klimawirksamen Emissionen Deutschlands (UBA 2017g). Dies umfasst Emissionen aus dem Brennstoffeinsatz im inländischen Flug-, Straßen- und Schienenverkehr sowie

Vorabfassung - wird durch die endgültige Fassung ersetzt.

Abbildung 4-4

Endenergieverbrauch des Verkehrs



* Ziele für Endenergieverbrauch gesamt; basiert auf dem Energiekonzept der Bundesregierung (2010)
** Ziel für Endenergieverbrauch sowohl des Güter- als auch des Personenverkehrs; basiert auf der Nachhaltigkeitsstrategie der Bundesregierung (2016)

Quelle: UBA 2017d, überarbeitet

im nationalen Schiffsverkehr. Der Straßenverkehr war dabei absolut betrachtet der größte Emittent: 154,6 Mio. t CO_{2eq} oder 17,1 % der klimawirksamen Emissionen aller Sektoren ließen sich allein auf den Straßenverkehr zurückführen (ebd.). Auf Pkw und Motorräder, die primär dem Personenverkehr zuzurechnen sind, entfielen 2015 dabei 98,8 Mio. t CO_{2eq}, auf den Güterverkehr und auf Busse 55,8 Mio. t CO_{2eq}. Die Treibhausgasemissionen des Verkehrssektors stiegen 2016 um 3,4 % auf rund 166 Mio. t CO_{2eq} weiter an (UBA 2017i). Anders als in anderen Sektoren liegen sie damit sogar über den Emissionen von 1990 (Abb. 2-1).

Ein Vergleich einzelner Verkehrsträger im Personenverkehr macht deutlich, dass neben dem Flugzeug der Pkw eine deutlich schlechtere Bilanz hinsichtlich der spezifischen Emissionen je Verkehrsleistungseinheit als andere Verkehrsmittel aufweist (Abb. 4-5). Diese schließen neben den direkten (einschließlich der Verdunstungsemissionen) auch indirekte Emissionen aus der dem Endenergieverbrauch vorgelagerten Prozesskette ein. Beim Luftverkehr ist die besondere Klimaschädlichkeit von Emissionen in großer Höhe mit dem Emissionsgewichtungsfaktor 2 berücksichtigt.

Beim Güterverkehr zeigt sich, dass Transporte auf der Straße und insbesondere per Flugzeug pro Mengeneinheit deutlich klimaschädlicher sind als Transporte auf der Schiene und per Schiff (Abb. 4-6).

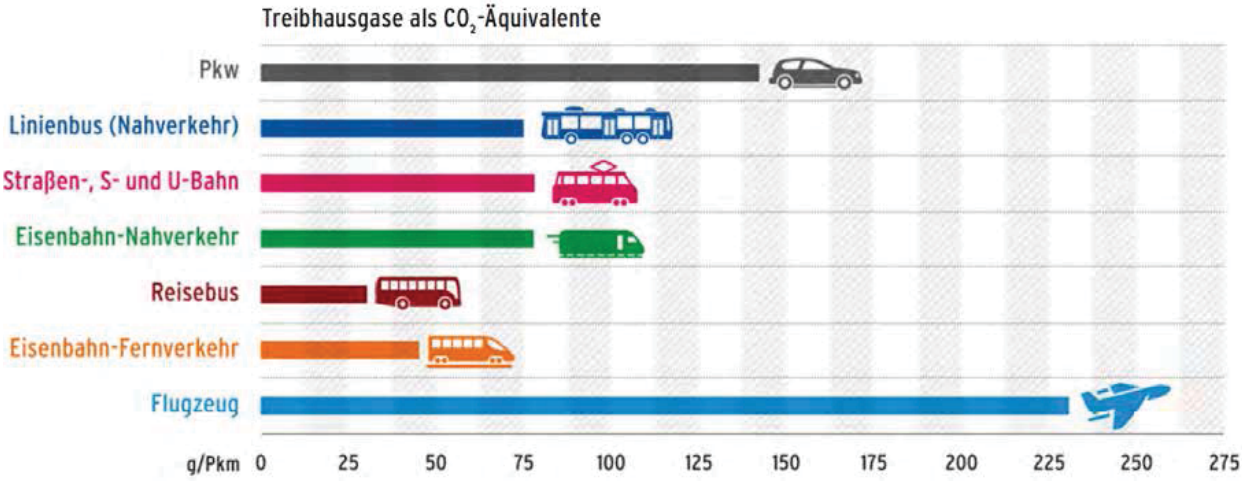
4.1.5 Straßenpersonenverkehr

84. Der Straßenpersonenverkehr wird in der Erhebung Verkehr in Zahlen als öffentlicher Straßenpersonenverkehr (ÖSPV) und motorisierter Individualverkehr (MIV) ausgewiesen (BMVI 2016d). Der ÖSPV umfasst vor allem den U-Bahn-, Straßenbahn- und Busverkehr (ebd., S. 218, Fn. 5). 2015 wurden im ÖSPV 9,5 Mrd. Personenwege zurückgelegt (ebd., S. 217). S-Bahnen werden nicht mit erfasst, weil diese zum öffentlichen Schienenpersonenverkehr zählen. Der MIV umfasst nach Verkehr in Zahlen den Verkehr mit motorisierten Zweirädern, Personen- und Kombinationskraftwagen (einschl. Taxi- und

Vorabfassung - wird durch die endgültige Fassung ersetzt.

Abbildung 4-5

Vergleich der spezifischen Emissionen einzelner Verkehrsträger im Personenverkehr je Personenkilometer (2010)



Quelle: UBA 2012, S. 33

Mietwagenverkehr) (ebd., S. 219). Im Jahr 2015 wurden mit dem MIV 58,3 Mrd. Personenwege zurückgelegt.

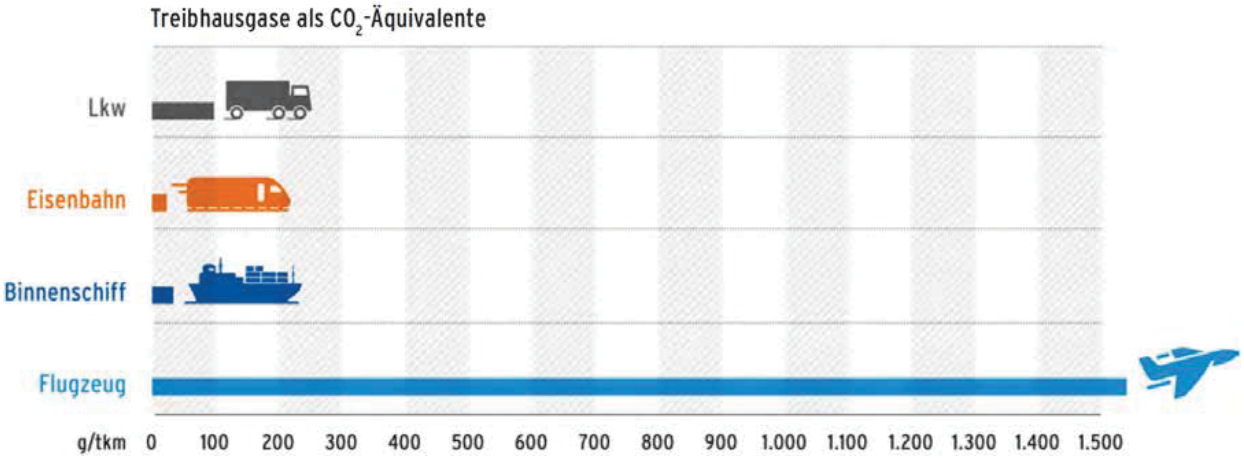
Im Jahr 2015 betrug die gesamte Personenverkehrsleistung in Deutschland 1.179,2 Mrd. Pkm. Davon entfielen auf den MIV 947,1 Mrd. Pkm und auf den ÖSPV 79,5 Mrd. Pkm. Der Personenverkehr hat derzeit einen Anteil von rund 65 % an den Treibhausgasemissionen des Verkehrs (BLANCK und ZIMMER 2016, S. 13). Aufgrund des hohen Anteils an der Verkehrsleistung und den ungünstigeren spezifischen Emissionen pro Leistungseinheit fällt ein Großteil dieser CO_2-Emissionen im Personenverkehr durch den MIV an.

4.1.6 Straßengüterverkehr

85. Der Güterverkehr ist in den letzten Jahren – mit der Ausnahme eines Einbruchs während der letzten Wirtschaftskrise 2008 – stetig gewachsen; eine Entkopplung von Wirtschaftswachstum und Güterverkehrsleistung fand nicht statt (Abb. 4-7).

Abbildung 4-6

Vergleich der spezifischen Treibhausgasemissionen einzelner Verkehrsträger im Güterverkehr je Tonnenkilometer (2010)

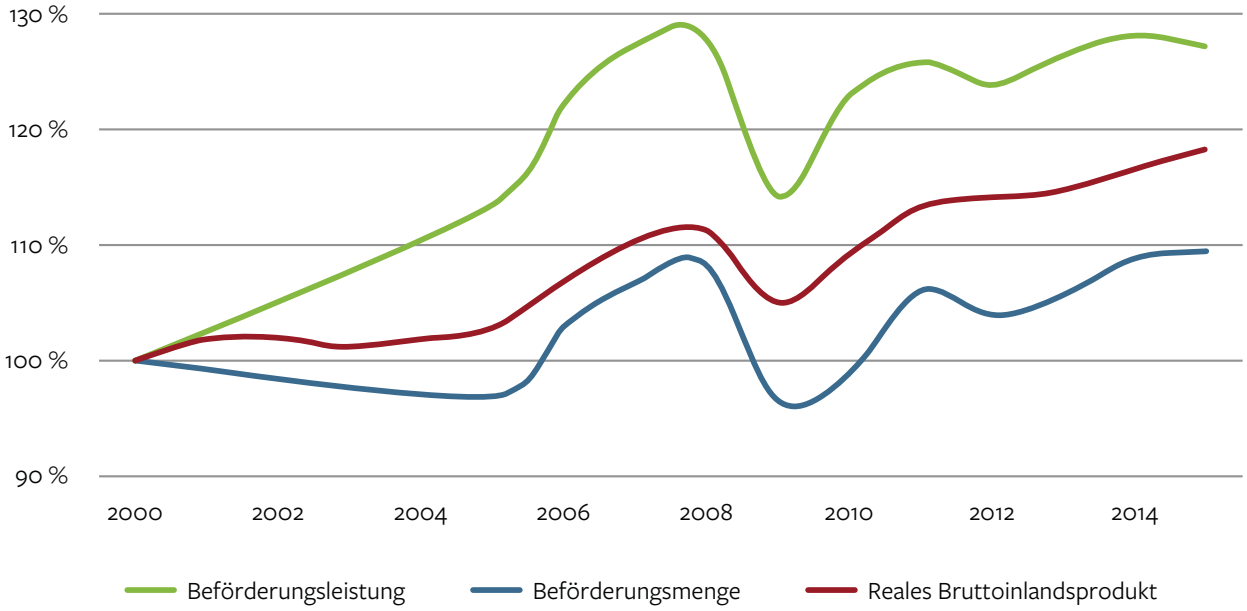


Quelle: UBA 2012, S. 15

Vorabfassung - wird durch die endgültige Fassung ersetzt.

Abbildung 4-7

Entwicklung des Güterverkehrs und des Bruttoinlandsprodukts



SRU 2017; Datenquelle: Statistisches Bundesamt 2017b; 2017c

Nach Verkehr in Zahlen betrug das Verkehrsaufkommen im Straßengüterverkehr im Jahr 2015 3.539 Mio. t (BMVI 2016d, S. 241). Auch beim Güterverkehr dominiert der Straßenverkehr deutlich (Abb. 4-8).

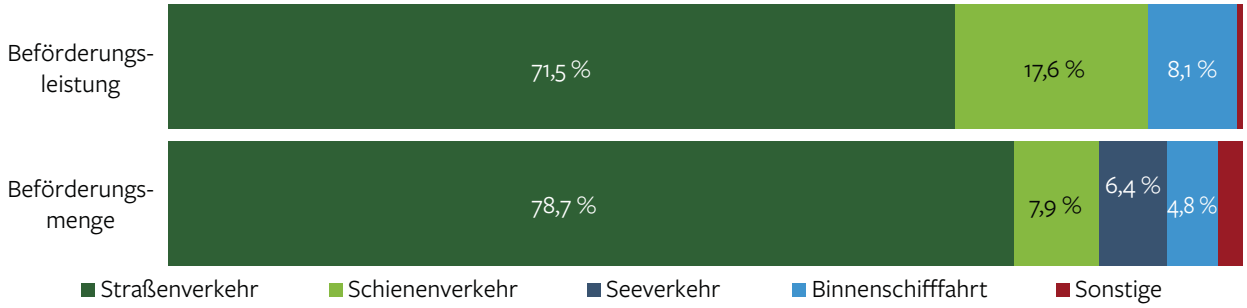
Die Verkehrsleistung des Straßengüterverkehrs im Jahr 2015 betrug 435,7 Mrd. tkm (BMVI 2016d, S. 244). Aufgrund der Dominanz des Straßengüterverkehrs in Bezug auf die Transportleistung von Gütern wird er in diesem Gutachten hervorgehoben diskutiert (vgl. Kap. 5). Der Straßengüterverkehr allein ist für etwa ein Drittel (Abb. 4-1) der gesamten Treibhausgasemissionen des Verkehrs verantwortlich, was auf die ungünstigen spezifischen Emissionen der Lkw je tkm (Tab. 4-1) und den hohen Anteil an der Güterverkehrsleistung zurückzuführen ist.

4.1.7 Schienenpersonenverkehr

86. Der Eisenbahnverkehr, definiert als Schienennah- und Schienenfernverkehr, wies im Jahr 2015 ein Verkehrsaufkommen von 2,7 Mrd. beförderten Personen auf (BMVI 2016d, S. 217). Die Verkehrsleistung lag im glei-

Abbildung 4-8

Anteile der Verkehrsmittel an der Güterbeförderung 2016



SRU 2017; Datenquelle: „Güterverkehr 2016: Neuer Höchststand beim Transportaufkommen“, Pressemitteilung des Statistischen Bundesamtes vom 17.02.2017

Vorabfassung - wird durch die endgültige Fassung ersetzt.

Tabelle 4-1

Vergleich der spezifischen CO_2-Emissionen und des Energieverbrauchs einzelner Verkehrsmittel im Güterverkehr (Bezugsjahr: 2014)

		Lkw	Güterbahn	Binnenschiff
Treibhausgase	g/tkm	101	24	31
Energieverbrauch	MJ/tkm	1,4	0,3	0,44

Quelle: UBA 2016e

chen Jahr bei 91,3 Mrd. Pkm (ebd., S. 219). Der Energieverbrauch wird für den gesamten Reisezugverkehr mit etwa 25 GJ Fahrstrom und 264 Mio. l Diesel angegeben (WIETSCHEL 2017).

4.1.8 Schienengüterverkehr

87. Der Schienengüterverkehr, verstanden als Eisenbahnverkehr, hatte im Jahr 2015 ein Verkehrsaufkommen von 367,3 Mio. t (BMVI 2016d, S. 241). Die Verkehrsleistung des Schienengüterverkehrs betrug 116,6 Mrd. tkm (ebd., S. 245). Der deutsche Schienengüterverkehr hatte nach Angaben des Verbands Deutscher Verkehrsunternehmen im Bezugsjahr 2012 einen Tank-to-Wheel-Jahresenergieverbrauch von insgesamt 15,5 GJ (WIETSCHEL 2017).

4.1.9 Binnenschiffsverkehr

88. 2015 wurden im Binnenschiffsverkehr Deutschlands 221,4 Mio. t. Güter transportiert (BMVI 2016d, S. 241). Die Verkehrsleistung betrug 55,3 Mrd. tkm (ebd., S. 245). Die spezifischen Treibhausgasemissionen der Binnenschifffahrt je tkm liegen etwa in der Größenordnung des Schienengüterverkehrs und weit unter denen des Straßengüter- oder Luftverkehrs (vgl. Tab. 4-1). Potenziell problematisch ist im Binnenschiffsverkehr, dass durch „Tanktourismus“ der inländische Verbrauch und der inländische Absatz von Dieselkraftstoffen weit auseinanderklaffen (vgl. IFEU 2016, S. 19 ff.). Das erschwert eine Einflussnahme über Energiesteuern außerhalb gesamteuropäischer Regelungen. Die Nachteile der Binnenschifffahrt bestehen in dem vergleichsweise weitmaschigen Wasserstraßennetz und einer niedrigen Transportgeschwindigkeit stehen die Vorteile der Umweltfreundlichkeit und der Massenleistungsfähigkeit gegenüber.

4.1.10 Seeschiffsverkehr

89. Die deutschen Seehäfen sind von großer Bedeutung für den internationalen Handel. Das Güterverkehrsaufkommen der Seeschifffahrt lag im Jahr 2015 in Deutschland bei 291,8 Mio. t, davon entfielen auf Schiffe der deutschen Handelsflotte lediglich 22,5 Mio. t (BMVI 2016d, S. 241). Die Verkehrsleistung der Seeschifffahrt nahm in den letzten Dekaden stetig von 851 Mrd. tkm im Jahr 1992 auf 1.982 Mrd. tkm im Jahr 2013 zu. Auch die Menge der ein- und ausgehenden Güter nahm deutlich zu. Die in deutschen Seehäfen umgeschlagene Gütermenge stieg von 217,4 Mio. t im Jahr 1998 auf 320,6 Mio. t im Jahr 2008 an. Nach einem Einbruch im Jahr 2009 betrug sie im Jahr 2015 296,2 Mio. t. (Abb. 4-9; ebd., S. 70 f.). Der Import wird vor allem durch Energieträger dominiert. Im Jahr 2015 machten Kohle, Rohöl und Erdgas 21,5 % der umgeschlagenen Tonnen aus (ebd., S. 201 und 203). Den Export dominierten mit 25,1 % Fahrzeuge, Maschinen, Halb- und Fertigwaren, gefolgt von Konsumgütern zum kurzfristigen Verbrauch mit 18,4 %. Insbesondere der Umschlag von Containern in Twenty-foot Equivalent Unit (TEU) verzeichnete von 1998 bis 2015 nahezu eine Verdreifachung. Das Gewicht der in Containern transportierten Ladung nahm von 43,9 Mio. t auf 123,0 Mio. t zu (ebd., S. 74 f.).

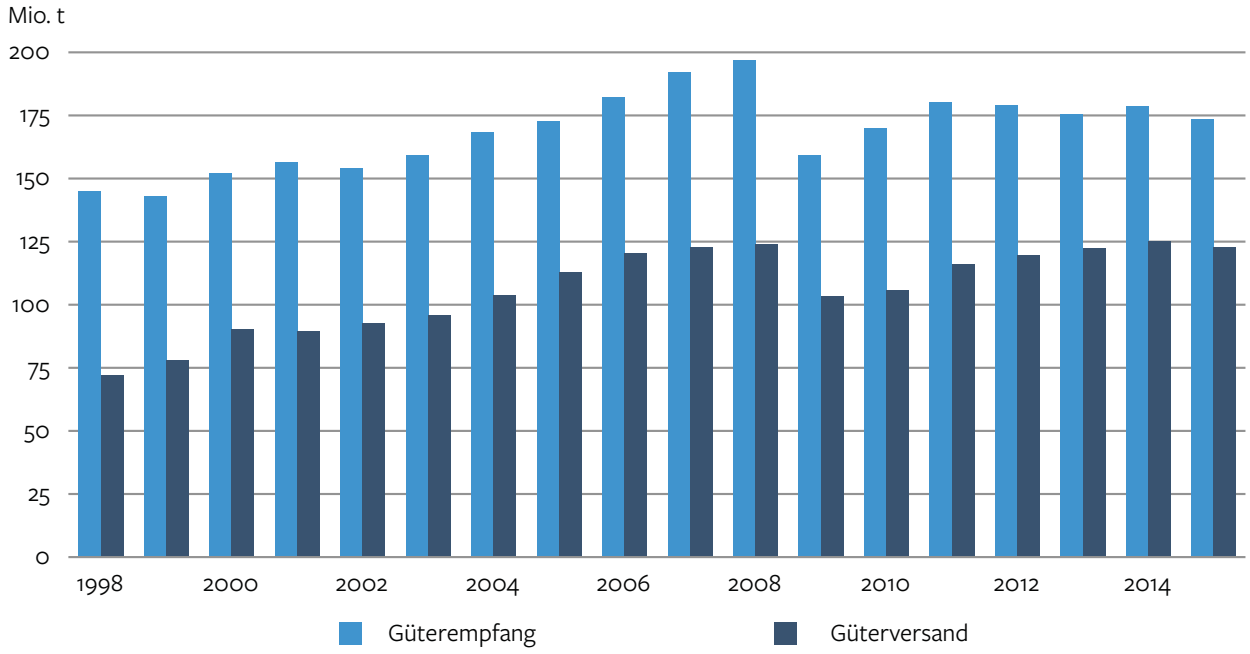
Die deutschen Häfen sind zudem ein bedeutender regionaler Wirtschaftsfaktor. Gemessen am Gesamtumschlag ist Hamburg nach Rotterdam und Antwerpen der drittgrößte Hafen Europas (Eurostat 2017), beim Containerumschlag zählt Hamburg zu den zwanzig umschlagsstärksten Häfen der Welt (UNCTAD 2014, S. 66).

Das beständig anwachsende Verkehrsaufkommen im Seeverkehr weltweit ist auf aufstrebende Volkswirtschaften in Schwellen- und Entwicklungsländern, eine steigende internationale Arbeitsteilung sowie einen dadurch zunehmenden globalen Warenaustausch zu-

Vorabfassung - wird durch die endgültige Fassung ersetzt.

Abbildung 4-9

Entwicklung der Gütermenge im deutschen Seegüterverkehr



SRU 2017; Datenquelle: BMVI 2016d, S. 72 f. und 183

rückzuführen. Die Einführung des Containers als standardisierter Transportbehälter in den 1960er-Jahren und seine anschließende Marktdurchdringung hat diese Entwicklung unterstützt. Allein seit 2009 nahm das Seeverkehrsaufkommen – trotz der wirtschaftlichen Krise – um 10 % zu (NABU 2016, S. 16; QUANTE et al. 2011, S. 286; UNCTAD 2014, S. 3). Es wird damit gerechnet, dass sich das Seehandelsaufkommen gegenüber heute bis 2050 vervierfacht (ITF 2015). Etwa 90 % des globalen Welthandels wird auf dem Seeweg abgewickelt (VDR 2017b; NABU 2016, S. 16; The Danish Ecocouncil 2011, S. 3).

90. Insgesamt besteht, vor allem im Containerverkehr, ein Trend zu immer größeren Schiffen. Galt ein Schiff mit einer Kapazität von 3.000 TEU in den 1990er-Jahren noch als groß, werden heute Schiffe mit mehr als 20.000 TEU gebaut und verdrängen kleinere vom Markt (Die Welt 14.03.2016; Deutsche Verkehrs-Zeitung 07.08.2014). Diese Entwicklung bringt eine Verbesserung der spezifischen Energieeffizienz mit sich (UNCTAD 2014, S. 30), stellt aber die Häfen sowie deren Hinterlandanbindungen vor große Herausforderungen. Sowohl die Häfen als auch deren Anbindung ans Hinterland müssen ausgebaut werden, um im Wettbewerb bestehen zu können. Die Erweiterung der Hafenflächen, das oft notwendige Ausbaggern der Fahrrinnen und der Ausbau der angebundenen Infrastrukturen von Straße und Schiene bringen vielfältige Umweltwirkungen mit sich, etwa Flächeninanspruchnahme und einen damit einhergehenden Verlust von natürlichem Lebensraum und Biodiversität.

Hinzu kommen Emissionen von NO_x, SO_x, Ruß und Feinstaub während der Hafenliegezeiten und Revierfahrten. Insgesamt ist die Seeschifffahrt für 15 % der globalen anthropogenen NO_x-Emissionen und für 13 % der SO_x-Emissionen verantwortlich (IMO 2015, S. 2). Die Schadstoffemissionen tragen zu gesundheitlichen Beeinträchtigungen der Bevölkerung bei (UNCTAD 2014, S. 30; QUANTE et al. 2011, S. 286 und 293; ISENSEE 2011, S. 353). Auch während der Seereise wird der weitaus größte Teil der Schadstoffe in einer Entfernung von unter 400 km zur Küste emittiert, in der stark befahrenen Nordsee werden bis zu 90 % der Emissionen in einer Entfernung von bis zu 90 km zur Küste ausgestoßen, 32 % in einer Entfernung von bis zu gut 22 km (MATTHIAS 2017; NABU 2016, S. 16). Die NO_x- und SO_x-Emissionen aus der Seeschifffahrt werden je nach Jahreszeit und Topographie bis weit aufs Festland transportiert (AULINGER et al. 2016; BRESSI et al. 2014). Die Zunahme des Kreuzschifffahrtsverkehrs, der häufig küstennah erfolgt und durch stadtnahe Liegezeiten geprägt ist, verschärft diese Problematik regional.

Vorabfassung - wird durch die endgültige Fassung ersetzt.

In der EU dürfen daher während der Hafenliegezeiten seit 2010 nur Kraftstoffe eingesetzt werden, deren Schwefelgehalt 0,1 % nicht übersteigt, seit 2015 gilt dieser Wert auch für Fahrten in Schwefelemissionsüberwachungsgebieten (Sulphur Emission Control Areas – SECA). Beispielsweise waren die Schwefelemissionen der Schifffahrt in Dänemark vor der strengeren Regulierung in den SECA viermal so hoch wie die Emissionen aller landgebundenen Quellen (The Danish Ecocouncil 2011, S. 7 ff.). Dennoch sind die Grenzwerte für den Schwefelgehalt von Kraftstoffen im Straßenverkehr deutlich strenger als für Kraftstoffe im Seeverkehr. Daher liegen die Emissionen von Luftschadstoffen weiterhin um ein Vielfaches höher als die des an Land zum Gütertransport eingesetzten Diesels (VDMA 2017). Gleichwohl sind Seeschiffe mit Blick auf die Treibhausgasemissionen je transportierter Tonne effizienter als Lkw.

91. Für die Treibhausgasemissionen und den Energieverbrauch ist insbesondere der Gütertransport mit Seeschiffen von Bedeutung (ITF 2015; IMO 2015, S. 4). Wenngleich die Reisen mit Kreuzfahrtschiffen und damit auch der Bestand dieser Schiffe zunehmen (MATTHIAS 2017), spielen sie bei den Treibhausgasemissionen des Seeverkehrs nur eine untergeordnete Rolle und werden daher hier nicht näher betrachtet. Ebenfalls nicht einbezogen wird der Güterverkehr mit dem Binnenschiff.

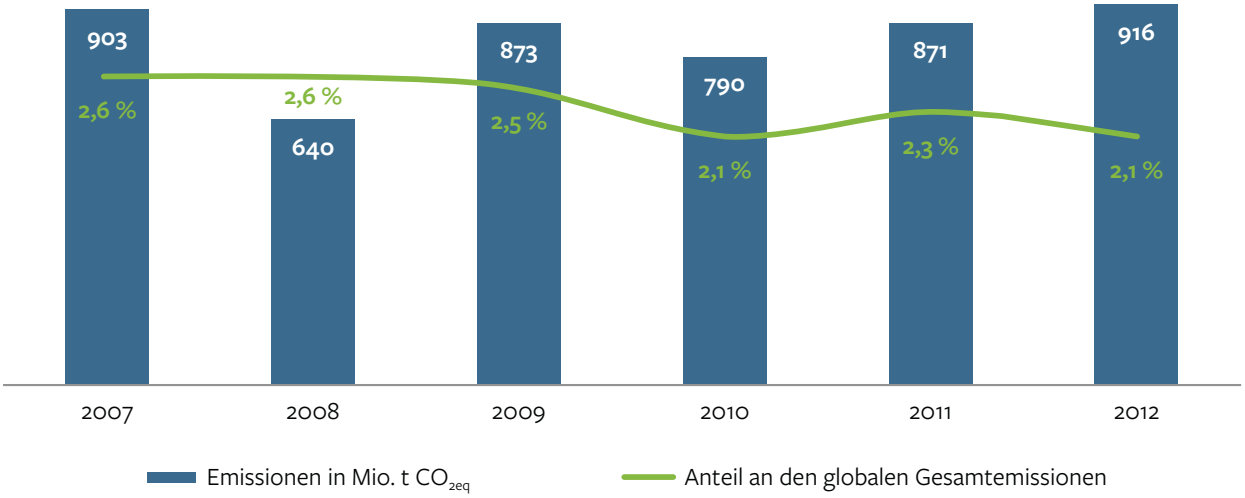
Im nationalen Treibhausgasinventar werden die Emissionen aus dem Kraftstoffeinsatz für von Deutschland ausgehende Seeverkehre nachrichtlich aufgeführt. Diese lagen im Jahr 2015 bei gut 6,9 Mio t (UBA 2017g). Die Deutschland angerechneten Emissionen des Seeverkehrs beziehen sich somit auf den Umschlag in deutschen Häfen und nicht auf die Handelsflotte.

Der Anteil des Seeverkehrs an den weltweiten Treibhausgasemissionen aller Verkehrsträger liegt trotz des hohen Anteils an der Transportleistung bei nur 10 % (VDR 2017b). Allerdings sind sowohl das Transportvolumen als auch die zurückgelegten Strecken erheblich (ISENSEE 2011, S. 535). Dementsprechend hoch sind die absoluten Treibhausgasemissionen des Seeverkehrs. Der Anteil des Seeschiffverkehrs an den globalen Gesamtemissionen lag nach Daten der International Maritime Organization (IMO) im Zeitraum von 2007 bis 2012 zwischen 2,1 und 2,6 % (durchschnittlich 2,4 %; s. Abb. 4-10). Dies entspricht durchschnittlichen Emissionen von jährlich 866 Mio. t CO_{2eq}. Damit liegen die weltweiten Emissionen der Seeschifffahrt bei etwa 96 % der gesamten Emissionen Deutschlands im Jahr 2015 (902 Mio. t CO_{2eq}).

Die IMO geht davon aus, dass die CO_2-Emissionen aus der Seeschifffahrt je nach Entwicklung der Weltwirtschaft und sich daraus ergebender Handelsströme bis 2050 im Vergleich zu 2012 um 50 bis 250 % steigen werden, wenn keine Maßnahmen ergriffen werden. Hinzu kommt, wenngleich ausgehend von einem niedrigen Niveau, eine deutliche Steigerung der Methanemissionen durch den zunehmenden Einsatz von Flüssiggas (liquefied natural gas – LNG) als Schiffskraftstoff (IMO 2015, S. 4). Mit

Abbildung 4-10

Entwicklung der Treibhausgasemissionen aus dem internationalen Seeverkehr absolut und in Anteilen der globalen Gesamtemissionen



SRU 2017, Datenquelle: IMO 2015, S. 1

Vorabfassung - wird durch die endgültige Fassung ersetzt.

der erwarteten Zunahme der CO_2-Emissionen würde der Anteil der Seeschifffahrt an den globalen Emissionen bei 14 % liegen (ITF 2015), wobei diese Annahme bei einer zunehmenden globalen Dekarbonisierung anderer Sektoren wahrscheinlich deutlich zu niedrig liegt. Sofern die Minderung der globalen Emissionen kompatibel mit dem 2°-Ziel verläuft, würde die Seeschifffahrt, soweit sie entsprechend der Projektionen wächst, 2050 zwischen 4 und 15 % des verfügbaren Emissionsbudgets in Anspruch nehmen (NELISSEN et al. 2016, S. 21).

4.1.11 Luftverkehr

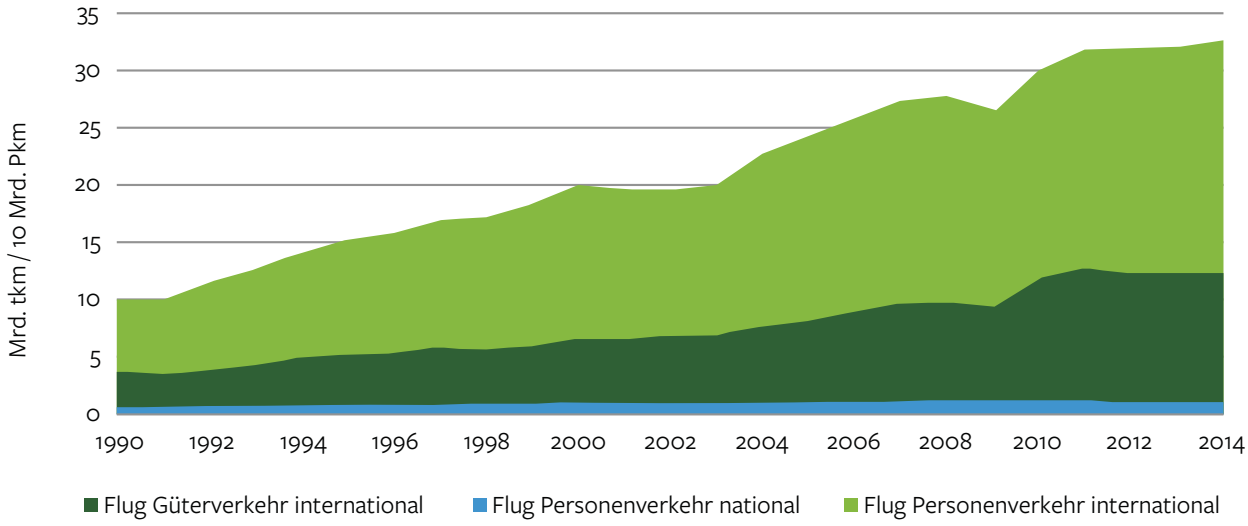
92. Daten über den Luftverkehr sind nur begrenzt vergleichbar, weil zur Erfassung des nationalen Anteils am (überwiegend internationalen) Luftverkehr unterschiedliche Bilanzgrenzen verwendet werden (BLANCK und ZIMMER 2016, S. 16). Verkehr in Zahlen und ältere Studien verwenden das Territorialprinzip, bei dem die im deutschen Luftraum erbrachte Verkehrsleistung ausgewiesen wird, während in neueren Untersuchungen in der Regel die Verkehrsleistung der aus Deutschland abgehenden Flüge bis zur ersten Landung außerhalb Deutschlands ausgewiesen wird. Der letztgenannte Bilanzierungsansatz ist auch die Grundlage der nationalen Treibhausgasinventare. Dieses Vorgehen korreliert auch eher mit dem für die Treibhausgasbilanzierung relevanten Kerosinabsatz (ebd., S. 14). Die Treibhausgasemissionen des internationalen Luftverkehrs werden zudem in den Treibhausgasinventaren lediglich nachrichtlich ausgewiesen, fließen aber in die Gesamtbilanz nicht mit ein. Dies bedeutet, dass die nationalen Minderungsziele den internationalen Luftverkehr nicht berücksichtigen.

Die Verkehrsleistung im Luftverkehr (Personen und Güter) ist stark gestiegen (Abb. 4-11). Das nationale Personenverkehrsaufkommen im Luftverkehr (beförderte Personen) in Deutschland lag im Jahr 2015 bei gut 194 Millionen (BMVI 2016d, S. 217). Dem relativ geringen Anteil des Luftverkehrs an der Verkehrsleistung in Deutschland von nur 5,5 % in 2010 steht ein sehr viel höherer Anteil am Energieverbrauch von 13,4 % gegenüber (UBA 2012, S. 30). Der Flugverkehr macht 14 % der Emissionen im Verkehrssektor aus. Er verzeichnet außerdem international erhebliche Wachstumsraten. Von 1991 bis 2015 gab es einen Anstieg der Verkehrsleistung von rund 171 % (UBA 2017e).

93. Die Güterverkehrsleistung ist in den letzten Jahren stark gestiegen (Tz. 81). Das gilt auch für den Güterluftverkehr, in dem die Verkehrsleistung in Deutschland von 0,5 Mrd. tkm im Jahr 1995 auf 1,3 Mrd. tkm im Jahr 2010 anstieg (UBA 2012, S. 6). Das Verkehrsaufkommen, das heißt der Anteil der mit dem Flugzeug transportierten Güter, lag im selben Jahr bei 1,3 % (ebd.). Ähnlich wie beim Personenverkehr verbuchte der Luftverkehr – verglichen mit seinem geringen Anteil an der Güterverkehrsleistung im Jahr 2010 von nur 0,21 % – einen sehr viel höheren Anteil am deutschlandweiten Energieverbrauch im Güterverkehr von 12,2 % im gleichen Jahr (ebd., S. 12).

Abbildung 4-11

Verkehrsleistung im Luftverkehr



SRU 2017; Datenquelle: IFEU 2016

Vorabfassung - wird durch die endgültige Fassung ersetzt.

94. Der Luftverkehr verursacht sehr hohe spezifische Treibhausgasemissionen. Er emittierte 2010 unter Berücksichtigung aller seiner klimawirksamen Effekte rund 1.540 g/tkm CO_{2eq} (UBA 2012, S. 14). Die große Klimarelevanz des Luftverkehrs resultiert auch daraus, dass neben CO_2 auch NO_x, Wasserdampf, SO_x, Ruß, Kondensstreifen und Zirruswolken in großen Höhen klimaschädliche Wirkungen haben. Wie groß diese zusätzliche Klimawirkung genau ist, ist bisher wissenschaftlich ungeklärt und wird international mit dem Emission Weighting Factor (EWF) bzw. dem Radiative Forcing Index (RFI) beschrieben (GRASSL und BROCKHAGEN 2007). Der EWF des Luftverkehrs wird in der Literatur mit dem Faktor 1,2 bis 2,7 angegeben (MYHRE et al. 2013; CAMES et al. 2015; LEE et al. 2010). Auch wenn CO_2-neutrale Kraftstoffe eingesetzt werden, bleiben diese Klimaeffekte zum Teil bestehen, sodass das wichtigste Ziel im Luftverkehr sein sollte – neben einer Reduktion des Endenergiebedarfs durch Effizienzsteigerung – das Verkehrswachstum möglichst zu dämpfen.

Die Treibhausgasemissionen des Luftverkehrs in Deutschland sind zwischen 1990 und 2014 um etwa 85 % gestiegen. Dieser Zuwachs resultierte ausschließlich aus dem internationalen Luftverkehr (aus Deutschland abgehende bzw. eingehende Flüge). Die Emissionen aus dem nationalen Flugverkehr sind dagegen leicht gesunken (Abb. 4-12). Auch für die Zukunft wird weiterhin ein Anstieg von Treibhausgasemissionen und Energieverbrauch erwartet. Im Referenzszenario des Projekts Klimaschutzbeitrag des Verkehrs wird davon ausgegangen, dass im Jahr 2050 der Endenergieverbrauch des Luftverkehrs 363 PJ beträgt, davon 26 PJ aus innerdeutschen Flügen. Das Klimaschutzszenario geht davon aus, dass es im Jahr 2050 immer noch 326 PJ sein könnten (BERGK et al. 2016, S. 188).

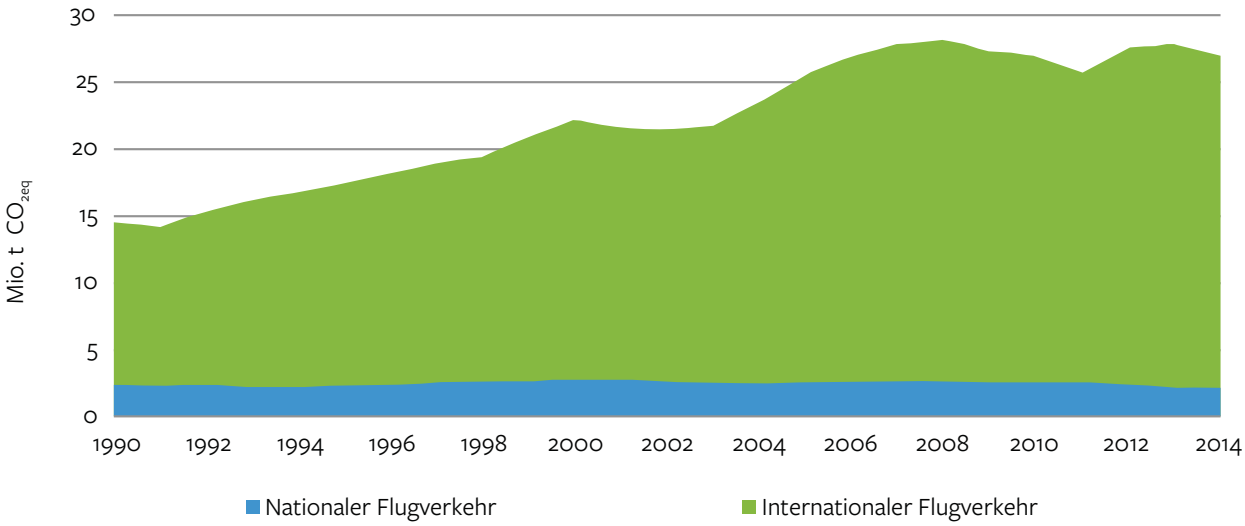
4.1.12 Politischer Rahmen: Ziele für den Verkehrssektor

95. Die EU hat sich das Ziel gesetzt, die Treibhausgasemissionen bis zum Jahr 2030 um 40 % und bis zum Jahr 2050 insgesamt um 80 bis 95 % zu vermindern. Das Ziel für 2030 wird einerseits durch den europäischen Emissionshandel verfolgt, zum anderen bestehen für alle nicht vom Emissionshandel erfassten Sektoren spezifische Minderungsziele auf Ebene der Mitgliedstaaten nach der Lastenteilungsentscheidung (engl. Effort-Sharing-Decision). Für Deutschland wurde ein Minderungsziel für diese Sektoren von – 38 % gegenüber 2005 vereinbart. Daneben bestehen auf EU-Ebene aggregierte (Tab. 4-2) und spezifische Treibhausgasminderungsziele (Tab. 4-3) für den Verkehrssektor, die überwiegend im Weißbuch Verkehr enthalten sind.

Im Luftverkehr hat die Internationale Zivilluftfahrtorganisation (International Civil Aviation Organization – ICAO) erstmals einen CO_2-Zulassungsgrenzwert für Verkehrsflugzeuge entwickelt, der ab 2020 gültig ist und ausschließlich CO_2 adressiert. Er umfasst das gesamte

Abbildung 4-12

Treibhausgasemissionen des Luftverkehrs im deutschen Inventar (1990–2014)



SRU 2017; Datenquelle: EEA 2017

Vorabfassung - wird durch die endgültige Fassung ersetzt.

Tabelle 4-2

Aggregierte Treibhausgasminderungsziele für den Verkehrssektor in der EU

Abgrenzung	2030	2050	Bedeutung
Inkl. internationalem Luft- und Seeverkehr	– 20 %	– 60 %	Strategiepapier
Interne Emissionen (ohne Zertifikatshandel); inkl. Luftverkehr, exkl. Seeverkehr	+ 20 % bis – 9 %	– 54 % bis – 67 %	Strategiepapier
Nur Seeverkehr		– 40 %	Strategiepapier

Quelle: BERGK et al. 2016, S. 64, verändert

Flugzeug, sodass nicht nur Anreize zur Triebwerkseffizienz sondern auch für verbesserte Aerodynamik und Leichtbau gegeben sind. Ab 2028 sollen dann auch ältere Flugzeugtypen nur noch gebaut werden, wenn sie den Standard einhalten.

Mit dem im März 2011 von der Europäischen Kommission veröffentlichten Weißbuch Verkehr hat sich die EU neben Klima- und Energieeffizienzzielen zahlreiche weitere ambitionierte Ziele im Verkehrssektor gesetzt. Angestrebt wird beispielsweise, die Nutzung von „mit konventionellem Kraftstoff betriebenen Pkw“ im Stadtverkehr bis 2030 zu halbieren. Bis 2050 soll in Städten vollständig auf solche Fahrzeuge verzichtet werden. Größere Städte sollen ihre Logistik bis zum Jahr 2030 im Wesentlichen CO_2-frei gestalten.

Bis 2030 soll außerdem 30 % des Straßengüterverkehrs mit Entfernungen von über 300 km auf andere Verkehrsträger wie Eisenbahn- oder Schiffsverkehr verlagert

Tabelle 4-3

Spezifische Treibhausgasminderungsziele für den Verkehrssektor

	Bezug	Abgrenzung	2020	Bedeutung
EU	je Fahrleistung im Straßenverkehr	Durchschnittliche NEFZ[1]-Flottenemissionen der im Bezugsjahr verkauften Fahrzeuge, abgegrenzt nach Hersteller	Pkw: 95 g/km CO_2 LNF[2]: 147 g/km CO_2	gesetzlich verankert
EU	je genutzte Endenergie im Verkehrssektor	Vorkettenemissionen werden mit einbezogen	– 6 % verpflichtend, zusätzlich bis zu – 4 % durch Emissionshandel/ CCS[3]/Erneuerbare für Offroad	gesetzlich verankert
D	je genutzte Endenergie an Otto-/Dieselkraftstoff	Im Inland verkaufte Otto-/Dieselkraftstoffe; Vorkettenemissionen der Biokraftstoffe werden mit einbezogen	– 6 %	gesetzlich verankert

[1] NEFZ = Neuer Europäischer Fahrzyklus

[2] LNF = leichte Nutzfahrzeuge mit einem zulässigen Gesamtgewicht bis zu 3,5 t

[3] CCS = Carbon Capture and Storage

Quelle: BERGK et al. 2016, S. 65, verändert

Vorabfassung - wird durch die endgültige Fassung ersetzt.

werden, bis 2050 sollen es mehr als 50 % sein. Außerdem soll bis zum Jahr 2050 ein europäisches Hochgeschwindigkeitsschienennetz geschaffen werden. Daneben soll die Länge des gesamten bestehenden Netzes bis 2030 verdreifacht werden. Alle Mitgliedstaaten sollen ein dichtes Schienennetz aufrechterhalten. Langfristig (bis 2050) soll der Großteil der Personenbeförderung über mittlere Entfernungen auf die Eisenbahn entfallen. Ein weiteres Ziel des Weißbuchs ist es, bis 2020 einen Rahmen für ein europäisches multimodales Verkehrsinformations-, Management- und Zahlsystem zu schaffen. Das Weißbuch stellt außerdem das Ziel auf, dass Nutzende und Verursachende umfassend zur Kostendeckung beitragen. Verzerrungen durch schädliche Subventionen sollen beseitigt und Erträge zur Finanzierung künftiger Verkehrsinvestitionen generiert werden (Europäische Kommission 2011c).

96. Auf nationaler Ebene existieren Ziele im Bereich Klimaschutz und Energieverbrauch. Die in der Nachhaltigkeitsstrategie 2002 enthaltenen Modal-Split-Ziele wurden dagegen in der Neuauflage 2016 nicht mehr aufgegriffen. Wie dargestellt, sieht der Klimaschutzplan 2050 der Bundesregierung bis 2030 eine Minderung der Treibhausgasemissionen des Verkehrssektors gegenüber 1990 um 40 bis 42 % vor (BMUB 2016c, S. 26). Das Energiekonzept von 2010 enthielt erstmals ein Ziel für den Endenergieverbrauch des Sektors. Er sollte bis 2020 um 10 % und bis 2050 um 40 % gegenüber 2005 sinken (BMU und BMWi 2011). In der Neuauflage der Nachhaltigkeitsstrategie liegt der Zielkorridor für den Endenergieverbrauch im Güterverkehr wie im Personenverkehr bis zum Jahr 2030 bei – 15 bis – 20 % (ggü. 2005) (Bundesregierung 2017, S. 38). Dieses Ziel gilt für beide Bereiche gleichermaßen, obwohl sie unterschiedlichen Voraussetzungen unterliegen. Der Endenergieverbrauch im Verkehr stieg im Jahr 2015 um 1,3 % (gegenüber 2005) und damit gegenläufig zu den Zielen des Energiekonzepts und der Nachhaltigkeitsstrategie (BMWi 2016, S. 44). Das 10 %-Reduktionsziel wird daher voraussichtlich bis 2020 nicht erreicht werden. Ziele bestehen auch zur Steigerung der Effizienz bei verschiedenen Verkehrsträgern (Tab. 4-4).

97. In der Neuauflage der Nachhaltigkeitsstrategie von 2016 sind drei Indikatoren enthalten, die unmittelbaren Mobilitätsbezug haben. Zwei betreffen den Endenergieverbrauch im Verkehr. Ein neuer Indikator wurde für den Ausbau des ÖPNV aufgenommen. Indikator 11.2.c betrifft die bevölkerungsgewichtete durchschnittliche ÖV-Reisezeit (ÖV – öffentlicher Verkehr) von jeder Haltestelle zum nächsten Mittel-/Oberzentrum. Dieses Ziel ist nicht quantifiziert. Als nicht unmittelbar mobilitätsbezogen aber relevant lassen sich überdies eine Anzahl weiterer Indikatoren einordnen. Dagegen wurden die Ziele aus dem Verkehrsbereich, die bisher nicht erreicht wurden, aus der Neuauflage der Nachhaltigkeitsstrategie gestrichen. Das gegenwärtige Indikatorensystem wird dementsprechend den Umweltproblemen des Verkehrs nur noch teilweise gerecht.

Mobilitäts- und Kraftstoffstrategie der Bundesregierung

98. Die 2013 verabschiedete Mobilitäts- und Kraftstoffstrategie der Bundesregierung (MKS) (BMVI 2013) gibt in erster Linie einen Überblick über die Möglichkeiten des Verkehrsbereiches, das Energiekonzept der Bundesregierung von 2010 umzusetzen. Das Ziel war es

Tabelle 4-4

Ziele zur Effizienzsteigerung bei verschiedenen Verkehrsträgern

	Sektor/Bezug	Basisjahr	2020	2030	Bedeutung
Welt	Transportleistung in der Seeschifffahrt bei neu gebauten Schiffen	2013	0 bis – 20 %	0 bis – 30 %	Richtlinie der UN (völkerrechtlich bindend)
EU	Verkehrsleistung im städtischen Straßenverkehr	2010		– 44 %	Strategiepapier von ERTRAC*
EU	Transportleistung im Langstrecken-Straßengüterverkehr	2010		– 29 %	Strategiepapier von ERTRAC

*ERTRAC = European Road Transport Research Advisory Council

Quelle: BERGK et al. 2016, S. 66, verändert

Vorabfassung - wird durch die endgültige Fassung ersetzt.

damals, den Endenergieverbrauch im Verkehrssektor um 10 % bis 2020 und um 40 % bis 2050 gegenüber 2005 zu reduzieren. Das Langfristziel weicht daher noch stark von der erforderlichen, praktisch vollständigen Dekarbonisierung des Verkehrs ab. Als Voraussetzung für die Ziele wurde die Diversifizierung der Energiebasis durch innovative Antriebstechnologien und alternative Kraftstoffe sowie die Steigerung der Energieeffizienz von Verbrennungsmotoren und die Optimierung von Verkehrsabläufen auf der Basis von marktwirtschaftlichen Ansätzen gesehen.

99. Die MKS ist rein technologiebezogen, verzichtet aber auf eine klare Aussage zu den favorisierten Technologien. Stattdessen fordert sie die Industrie auf, unterschiedliche und innovative Technologiekonzepte zu verfolgen, und nennt die Bereiche Elektromobilität, Wasserstofftechnologie, LNG für den Schifffahrtsbereich sowie alternative Kraftstoffe für die Luftfahrt. Die MKS sieht den Verkehrsbereich in einer schwierigen Marktvorbereitungsphase und die Notwendigkeit eines effektiveren und schnelleren Systemwandels.

Die größten CO_2-Einsparpotenziale werden im Pkw- und Schienenverkehr verortet, wobei im Straßenverkehr ein verstärkter Einsatz von Batterie- und Brennstoffzellentechnologie und Maßnahmen am Fahrzeug für relevant gehalten werden. Im Schienenverkehr soll die Strategie der Deutschen Bahn unterstützt werden, bis 2050 auf 100 % erneuerbaren Strom umzusteigen, indem wirtschaftliche Umsetzungsfaktoren und die zusätzliche Erzeugung erneuerbaren Stroms gefördert werden.

Im Straßengüterverkehr liegt der Fokus auf einer weiteren Hybridisierung und Dual-Fuel-Fahrzeugen. Dagegen sieht die MKS für die Luftfahrt keine geeigneten Kraftstoffalternativen, sondern die Lösung in einem international wirksamen und marktwirtschaftlichen Klimaschutzinstrument in Verbindung mit einer Emissionsobergrenze. Es wird darauf hingewiesen, dass Biokraftstoffe (Biokerosin) als derzeit einzige denkbare Kraftstoffalternative zu fossilem Kerosin mit großen Unsicherheiten hinsichtlich der Verfügbarkeit nachhaltiger Biomasse, der Anlagentechnologie und der Kosten verbunden sind.

In der Seeschifffahrt wird die Umstellung der Kraftstoffe von Schweröl auf Diesel und auf LNG erwartet. Letzteres soll durch eine Markteinführungsstrategie gestützt werden. Etwas vage ist außerdem vorgesehen, zusätzlich zu bestehenden Effizienzgrenzwerten marktwirtschaftliche Klimaschutzinstrumente einzuführen.

100. Damit ölbasierte Kraftstoffe abgelöst werden können, soll die energiebezogene Biokraftstoffquote zu einer Treibhausgasquote ab 2015 fortentwickelt werden. Das eigentlich für 2018 vorgesehene Ende der Steuerbegünstigungen für komprimiertes und verflüssigtes Erdgas sowie für Flüssiggas wurde bis 2026 bzw. 2022 verlängert. Die MKS sieht vor, die Infrastrukturentwicklung für alternative Kraftstoffe auf nationaler und europäischer Ebene voranzutreiben. Die Basis dafür bietet der Vorschlag der Europäischen Kommission zur „Clean-Power-for-Transport"-Initiative, der als Rahmen für den Aufbau der alternativen Kraftstoffinfrastrukturen dienen soll. Die privaten Akteure sollen für den Aufbau verantwortlich sein, allerdings sollen die staatlichen Rahmenbedingungen für die Marktvorbereitung verbessert werden. Eine Anpassung der Ziele hat auf politischer Ebene bereits stattgefunden und eine Fortschreibung der MKS ist vorgesehen. Aktuell stehen bei der Diskussion der MKS die Themen Digitalisierung, Sektorkopplung sowie die Automatisierung des Verkehrs im Mittelpunkt. Im MKS-Kontext wurden fortlaufend wissenschaftliche Begleitanalysen erstellt, die im Hinblick auf die Themen deutlich weiter gefasst sind als die ursprüngliche Strategie und zum Beispiel auch die Bereiche Verlagerung sowie weitere technologische Optionen umfassen.

Zwischenfazit

101. Im Verkehrssektor bestehen zwar zum Teil ambitionierte Ziele, deren Erreichung aber nicht mit dem nötigen Nachdruck verfolgt wird. So haben die Bundesregierung und die Industrie beispielweise im Nationalen Entwicklungsplan Elektromobilität beschlossen, dass die Anzahl der Elektrofahrzeuge auf deutschen Straßen bis 2020 eine Million und bis 2030 sechs Millionen betragen soll (Bundesregierung 2009), was gegenwärtig nicht realistisch erscheint. Den sich aus dem Klimaabkommen von Paris ergebenden klimapolitischen Notwendigkeiten wird das gegenwärtige Zielsystem allerdings selbst bei Zielerreichung nicht gerecht (BERGK et al. 2017).

102. Ein konsistentes Zielsystem ist eine wichtige Stütze für die Transformation des Verkehrssektors. Dafür muss auf politischer Ebene der klare Wille vorhanden sein, diese Ziele auch zu erreichen. Um die Dekarbonisierung des Verkehrssektors erreichen zu können, muss mit seiner Transformation jetzt begonnen werden. Angesichts der durchschnittlichen Lebensdauer eines Kraftfahrzeugs und der Investitionszyklen in der Fahrzeugindustrie sollten zentrale Pfadentscheidungen jetzt getroffen werden, um Lock-ins und sunk investments zu vermeiden. Ein klares Umsteuern in allen Bereichen ist schnellstmöglich notwendig.

Vorabfassung - wird durch die endgültige Fassung ersetzt.

4.2 Möglichkeiten zur Minderung des Treibhausgasausstoßes des Verkehrssektors

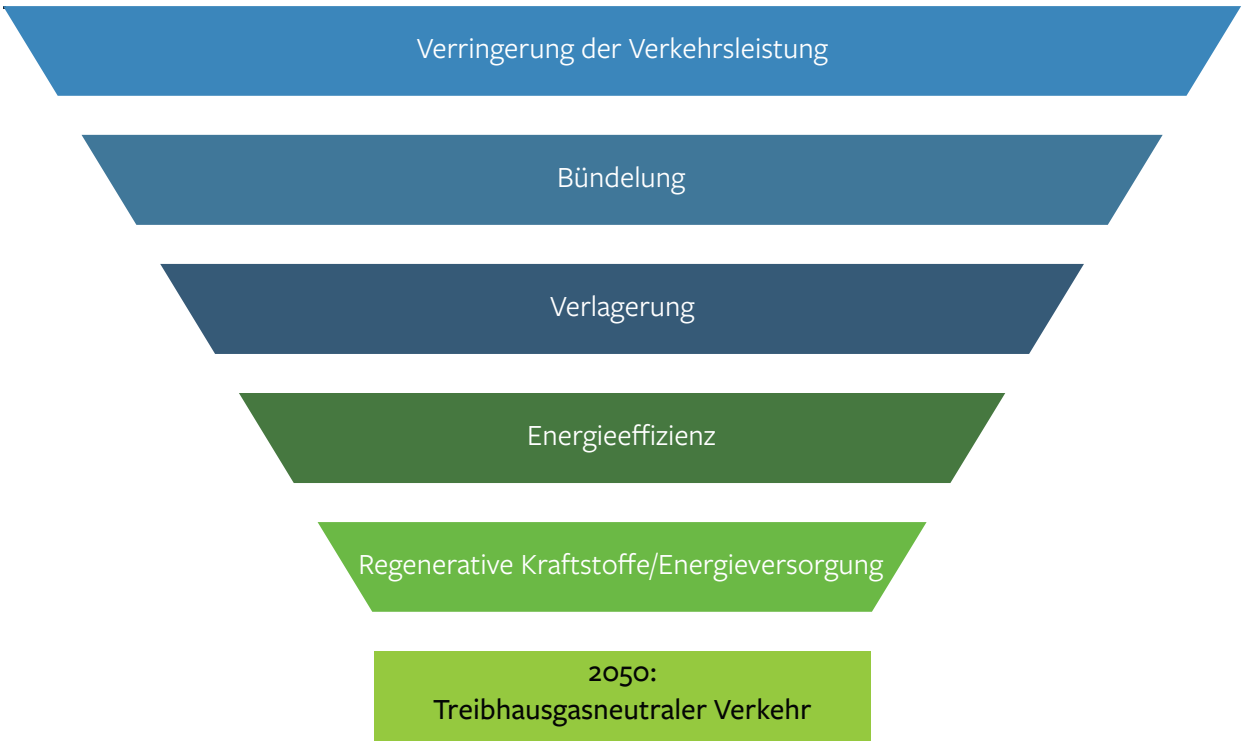
103. Um den Verkehr weitestgehend treibhausgasneutral auszugestalten, gibt es verschiedene Ansatzpunkte. Der Schwerpunkt der Diskussion liegt gegenwärtig auf der Umstellung auf alternative Antriebe. Dabei steht insbesondere die Elektromobilität im Fokus der Aufmerksamkeit. Damit diese auch tatsächlich zur Dekarbonisierung beiträgt, ist die gleichzeitige Umstellung der Stromversorgung auf erneuerbare Energien unabdingbare Voraussetzung. Da auch erneuerbare Energien in Zukunft nicht unbegrenzt zur Verfügung stehen werden und nicht frei von Umweltbelastungen sind, muss zudem der Energieverbrauch des motorisierten Verkehrs je Fahrzeugkilometer (Fz-km) gesenkt werden. Ansatzpunkte für eine Reduktion des Endenergieverbrauchs sind insbesondere technische fahrzeugseitige Effizienzmaßnahmen, aber auch Verbesserungen des Verkehrsflusses und Geschwindigkeitsanpassungen.

Nicht nur zur Dekarbonisierung, sondern auch zur Reduktion der sonstigen Umwelt- und Gesundheitsbelastungen des Verkehrssektors tragen die Vermeidung und Verlagerung von Verkehr bei. Zudem werden Rebound-Effekte vermindert, die mit einer Verringerung des Endenergieverbrauchs des motorisierten Verkehrs einhergehen können. Zum einen sollte die Verkehrsleistung im motorisierten Straßenverkehr (d. h. die gefahrenen Pkm bzw. tkm) insgesamt verringert werden. Durch die Bündelung von Fahrten und weitere logistische Effizienzmaßnahmen, die zu einer Erhöhung der durchschnittlichen Fahrzeugauslastung beitragen, kann außerdem die Fahrleistung (gemessen in Fz-km) weiter reduziert werden. Zum anderen müssen – soweit möglich – Verkehre von energie- und treibhausgasintensiven Verkehrsträgern auf relativ klimaverträgliche Verkehrsträger (insb. Schiene und Binnenschiff, in der Stadt auch auf den Umweltverbund, d. h. auf den ÖPNV, Fahrrad- und Fußverkehr) verlagert werden.

Zusammenfassend lässt sich somit festhalten, dass der Weg zu einem treibhausgasneutralen und umweltverträglichen Verkehr über eine „Dekarbonisierungskaskade“ führt (Abb. 4-13). Diese beginnt mit der Verringerung

Abbildung 4-13

Dekarbonisierungskaskade



SRU 2017

Vorabfassung - wird durch die endgültige Fassung ersetzt.

der Verkehrsleistung und endet mit der Umstellung auf eine vollständig regenerative Versorgung für den letztlich verbleibenden Energiebedarf. Der Aufbau der „Dekarbonisierungskaskade“ spiegelt dabei keine Maßnahmenpriorisierung wider, sondern folgt dem Verlauf der Emissionsentstehung im Verkehrssektor. Je eher Instrumente zur Dekarbonisierung in dieser Kaskade ansetzen, desto umfassender ist ihre Wirkung. Wegen der hohen Dringlichkeit der Dekarbonisierung des Verkehrssektors müssen Maßnahmen jedoch zeitgleich an allen Stufen der Kaskade ansetzen.

4.2.1 Wissenschaftliche Studien und Verkehrsprognose 2030

104. Studien zur möglichen Entwicklung der verkehrserzeugenden Aktivitätsniveaus, der logistischen und technischen Effizienz, der Energieversorgung und der Treibhausgasemissionen im Verkehr sind in der Regel Szenarioanalysen. Dafür werden oftmals Referenzszenarien (Basisszenarien) mit Zielszenarien verglichen. In einigen Untersuchungen wird auch die Wirkung bestimmter Instrumente explizit abgeschätzt (Wirkungsstudien). Um die – zwischen den Studien variierenden – Klimaschutzziele im Verkehr zu erreichen, werden in den Studien verschiedene Maßnahmen identifiziert, die in ökonomische, ordnungsrechtliche, planerische und sogenannte weiche Instrumente untergliedert werden können (s. Überblick in den drei Metastudien RUNKEL et al. 2016a; 2015; BLANCK und ZIMMER 2016). Diese Instrumente wirken in Richtung Verkehrsvermeidung, Verkehrsverlagerung, Steigerung der Effizienz und Einsatz alternativer Antriebstechnologien bzw. Kraftstoffe.

Studien, die Aussagen zur Entwicklung der Treibhausgasemissionen des Verkehrs treffen, enthalten regelmäßig auch Prognosen zur Entwicklung des Verkehrsaufkommens bzw. der Verkehrsleistung. Viele Studien stützen ihre Referenzszenarien ganz oder teilweise auf die Verkehrsverflechtungsprognose (auch Verkehrsprognose) 2030 (BVU Beratergruppe Verkehr + Umwelt et al. 2014), die als Grundlage für die Entwicklung des Bundesverkehrswegeplans 2030 erstellt wurde (z. B. KASTEN et al. (2016), Öko-Institut et al. (2016) und KREYENBERG et al. (2015)). Dies erleichtert die Vergleichbarkeit unterschiedlicher Studien aufgrund ähnlicher Rahmendaten. Einige ältere Studien (z. B. ZIMMER et al. 2013; MATTHES et al. 2013) fußen auch auf der Vorläuferprognose, der Verkehrsprognose 2025 (Intraplan Consult und BVU 2007), oder legen Studien zugrunde, die auf der Verkehrsprognose 2025 basieren (BLANCK et al. 2013). Aufgrund ihrer Bedeutung sollen die Ergebnisse der Verkehrsverflechtungsprognose 2030 daher nachfolgend kurz dargestellt werden.

Verkehrsverflechtungsprognose 2030

105. In der Verkehrsprognose 2030 sind im Verkehrsaufkommen die Fahrten sowohl der Wohnbevölkerung Deutschlands als auch der Ausländerinnen und Ausländer enthalten, soweit sie im Verkehr zwischen Deutschland und dem Ausland oder im Durchgangsverkehr das Territorium der Bundesrepublik Deutschland berühren (Territorialprinzip). Entsprechend sind im Güterverkehr die Transporte sowohl ausländischer, als auch deutscher Versender/-innen und Empfänger/-innen erfasst, die das deutsche Territorium berühren (BVU Beratergruppe Verkehr + Umwelt et al. 2014, S. 21). Die Prognose stellt keine Fortschreibung ohne zusätzliche Maßnahmen dar, sondern geht davon aus, dass zahlreiche verkehrspolitische Maßnahmen ergriffen werden. Beispielsweise wird angenommen, dass die Preise für Kraftstoffe deutlich angehoben werden (Tab. 4-5).

Personenverkehr in der Verkehrsverflechtungsprognose 2030

106. Die Verkehrsprognose 2030 geht von einem Anstieg des gesamten Personenverkehrsaufkommens (einschließlich der nicht-motorisierten Fahrten) von 2010 bis 2030 von 101,8 Mrd. auf 103,0 Mrd. Fahrten aus. Das entspricht einer Steigerung von 1,2 %. Das Verkehrsaufkommen allein des motorisierten Verkehrs wächst um 3,8 %. Betrachtet man die Verkehrsleistung, steigt diese aufgrund des überproportional wachsenden Fernverkehrs und steigender Fahrtweiten sogar noch stärker an, um 12,2 % von insgesamt 1.184 Mrd. Pkm im Jahr 2010 auf 1.329 Mrd. Pkm in 2030. Nur bezogen auf den motorisierten Verkehr steigt die Verkehrsleistung um 12,9 % (durchschnittlich um 0,6 % pro Jahr).

Im MIV nimmt die Fahrtenzahl von 56,5 Mrd. auf 59,1 Mrd. zu (4,6 %). Damit steigt der Anteil des MIV am motorisierten Verkehr insgesamt leicht von 82,7 % auf 83,3 %. Die Verkehrsleistung wächst aufgrund des überdurchschnittlichen Anstiegs der längeren Fahrten mit rund 10 % stärker als das Aufkommen (von 902 Mrd. auf 992 Mrd. Pkm). Da im expandierenden Luftverkehr und im ebenfalls überdurchschnittlich wachsenden Schienenverkehr je Fahrt größere Distanzen zurückgelegt werden, nimmt der Anteil des MIV an der Verkehrsleistung – anders als sein Anteil am Verkehrsaufkommen – etwas ab, von 80,8 % auf 78,6 % (BVU Beratergruppe Verkehr + Umwelt et al. 2014, S. 4).

Vorabfassung - wird durch die endgültige Fassung ersetzt.

Vorabfassung - wird durch die endgültige Fassung ersetzt.

Tabelle 4-5

Verkehrsprognose 2030: Entwicklung von Fahrleistung, Energieverbrauch und CO_2-Emissionen des Straßenverkehrs

	Absolute Werte		Veränderung 2010–30 (%)	
	2010	2030	insgesamt	pro Jahr
Fahrleistung (Mrd. Fz-km)	704,8	789,8	12,1	0,6
Kraftstoffverbrauch (Mio. t)				
Kyoto-Monitoring[1]	46,0	32,9	– 28,6	– 1,7
Energiebilanzen[2]	49,6	38,2	– 22,8	– 1,3
TREMOD[3]	52,2	38,7	– 25,8	– 1,5
Stromverbrauch (TWh)	0,0	13,9	–	–
Endenergieverbrauch (PJ)				
Kyoto-Monitoring[1, 4]	1.990	1.548	– 22,2	– 1,2
Energiebilanzen[2]	2.110	1.786	– 15,4	– 0,8
TREMOD[3]	2.222	1.808	– 18,6	– 1,0
Direkte CO_2-Emissionen (Mio. t)				
Kyoto-Monitoring[1, 4]	145,5	112,3	– 22,8	– 1,3
TREMOD[3]	162,0	127,4	– 21,3	– 1,2
Gesamte CO_2-Emissionen (Mio. t)				
TREMOD[3]	182,8	144,0	– 21,2	– 1,2

[1] Ohne Biokraftstoffe, [2] Basis Kraftstoffabsatz, [3] Basis effektiver Verbrauch, [4] Ohne Strom

Quelle: BVU Beratergruppe Verkehr + Umwelt et al. 2014, S. 343

Die Verkehrsverflechtungsprognose geht davon aus, dass die Wirtschaft weiter wächst und mit ihr auch die Individualmotorisierung. Die Zahl älterer Menschen nimmt zu, was wegen des Wegfalls zum Beispiel von Arbeitswegen das Verkehrsaufkommen dämpft. Dieser Studie zufolge sind die Menschen jedoch zukünftig auch in höherem Alter eher mit dem Auto unterwegs. Daraus folgt, dass im MIV die Anzahl der Fahrten und die Fahrleistung vor allem durch mehr Freizeitverkehr und längere Strecken steigt (ebd.).

Güterverkehr in der Verkehrsverflechtungsprognose 2030

107. Zwischen den Jahren 2010 und 2030 steigt der Verkehrsverflechtungsprognose 2030 zufolge das gesamte Transportaufkommen auf dem Gebiet der Bundesrepublik Deutschland um 18 %, die entsprechende Transportleistung wächst um 38 %. Sowohl im Schienen- als auch im Straßengüterverkehr nehmen die Transportleistungen deutlich stärker als das Transportaufkommen zu. Dies liegt daran, dass Transporte längere Strecken zurücklegen. Im gesamten Güterverkehr steigen die mittleren Transportweiten um 17 % von 164 km im Jahr 2010 auf 192 km im Jahr 2030. Die Transportintensität, das heißt die auf das Bruttoinlandsprodukt (BIP) bezogene Transportleistung ausgedrückt in tkm pro Euro, steigt zwischen 2010 und 2030 um 13 % an.

Der Straßengüterverkehr wächst beim Transportaufkommen von 3,1 Mrd. t im Jahr 2010 auf 3,6 Mrd. t im Jahr 2030 (17 %). Die Verkehrsleistung nimmt um 39 % von 437 Mrd. tkm auf 607 Mrd. tkm zu. Vom absoluten Wachstum des Güterverkehrs aller Verkehrsträger um 654 Mio. t bzw. 230 Mrd. tkm entfallen damit 80 % bzw. 74 % auf den Straßengüterverkehr. Allerdings realisieren sowohl der Schienen- als auch der Binnenschiffsverkehr

zukünftig ein deutlich stärkeres relatives Aufkommenswachstum als der Straßenverkehr, sodass der Marktanteil der Straße beim Aufkommen im Prognosezeitraum von 84,1 % auf 83,5 % minimal sinkt. Bei der Verkehrsleistung des Straßengüterverkehrs ist zwar ein leicht niedrigeres Wachstum als im Schienengüterverkehr, dafür jedoch ein deutlich stärkeres Wachstum gegenüber der Binnenschifffahrt zu erkennen, sodass der Anteil an der Verkehrsleistung leicht von 72 % auf 72,5 % ansteigt.

Treibhausgasemissionen nach der Verkehrsverflechtungsprognose 2030

108. Die Verkehrsprognose 2030 bezieht die drei Treibhausgase Kohlenstoffdioxid (CO_2), Lachgas (N_2O) und Methan (CH_4) ein und stellt diese einzeln sowie in der Summe umgerechnet auf CO_{2eq} dar. Da N_2O und CH_4 weniger als 1 % aller Treibhausgasemissionen des Verkehrs ausmachen, werden sie nur auf einem sehr aggregierten Niveau prognostiziert (Überblick über die Verkehrsprognose 2030 s. Tab. 4-5; BVU Beratergruppe Verkehr + Umwelt et al. 2014, S. 324). Trotz des Anstiegs der Verkehrsleistung und der Fahrleistung wird ein Rückgang der Treibhausgasemissionen um etwa ein Viertel vorhergesagt. Ursächlich hierfür sind insbesondere die Flottenerneuerung und die damit einhergehenden Reduktionen beim spezifischen Kraftstoffverbrauch und Treibhausgasausstoß der Fahrzeuge. So sinkt der spezifische Verbrauch von Pkw mit konventionellem verbrennungsmotorischem Antrieb zwischen 2010 und 2030 um 1,5 % pro Jahr, der von Lkw um 1 % pro Jahr. Diesen Verbesserungen der Fahrzeugeffizienz liegt unter anderem auch die Annahme einer Weiterführung klimapolitischer Maßnahmen im Verkehrssektor zugrunde.

109. Bei einer Entwicklung ohne weitere klimapolitische Maßnahmen (Business-as-usual-Szenarien) gehen mehrere Studien bzw. Szenarien davon aus, dass der Treibhausgasausstoß des Verkehrs in erster Linie aufgrund der erwarteten Zunahme des Güter- und Luftverkehrs weiter ansteigen wird (RUNKEL et al. 2015, S. 3; Projektionsbericht 2017 für Deutschland gemäß Verordnung (EU) Nr. 525/2013 über ein System für die Überwachung von Treibhausgasemissionen). Ähnliches gilt für die Entwicklung des Endenergieverbrauchs (RUNKEL et al. 2015, S. 5).

Bewertung

110. Die Verkehrsprognose 2030 bildet eine wichtige Basis für die Szenarienbildung und auch für die Entwicklung klimapolitischer Strategien für den Verkehrssektor. Allerdings können ihre Ergebnisse und Annahmen an einzelnen Punkten durchaus kritisch hinterfragt werden. Das gilt insbesondere für die Annahme, dass alle Projekte des vordringlichen Bedarfs des Bundesverkehrswegeplans 2003 (BVWP 2003) bis zum Jahr 2030 umgesetzt sind. Das hat wegen des damit verbundenen induzierten Verkehrs eine unrealistisch hohe Zunahme des Verkehrsaufkommens in der Prognose zur Folge (BUND 2016, S. 6). Andererseits wird eine reale Verteuerung von Energie- und Kraftstoffkosten unterstellt, deren Umsetzung nicht absehbar ist und die dämpfend auf die vorhergesagte Verkehrsnachfrage wirkt. Das auf die Verkehrsprognose 2030 aufsetzende Basisszenario des Projektes Renewbility III modifiziert letztere Annahme, indem es keine Erhöhung der Energiesteuern, keine Fortschreibung der Pkw-Grenzwerte für CO_2-Emissionen und einen geringeren Anteil an Biokraftstoffen unterstellt und entsprechend zu höheren Fahrleistungen und CO_2-Emissionen als die Verkehrsprognose 2030 kommt (Öko-Institut et al. 2016, S. 21 ff.). Einerseits wird angenommen, dass in Zukunft der Dienstleistungsbereich noch mehr an Bedeutung gewinnen wird. Dies könnte, wie auch die zunehmende Digitalisierung, zu einer Abnahme der Transportintensität beitragen. Schließlich könnte auch die Produktion zunehmend höherwertiger Industrieprodukte dazu führen, dass weniger Tonnen je Euro transportiert werden. Andererseits können ein verstärkter überregionaler Handel als Ausdruck engerer wirtschaftlicher Verflechtungen und zusätzliche Nachfrage nach Konsum- und Investitionsgütern durch Internethandel zu einem höheren als dem prognostizierten Verkehrswachstum führen, wenn nicht entsprechende verkehrs- und umweltpolitische Maßnahmen ergriffen werden. Eine Ausrichtung der Dekarbonisierungsstrategie für den Verkehrssektor an klimapolitisch definierten Zielszenarien wird deshalb ausdrücklich empfohlen.

4.2.2 Neue Antriebe und Umstieg auf treibhausgasneutrale Energieträger

111. Bisher basiert die Energieversorgung des Verkehrssektors nahezu vollständig auf fossilem Erdöl, bei dessen Verbrennung Schadstoffe und CO_2 frei werden. Anders als in stationären Feuerungsanlagen in Industrie und Stromwirtschaft ist es bei der Verbrennung fossiler Energieträger in Fahrzeugen nicht möglich, die CO_2-Emissionen abzuscheiden und zu nutzen oder unterirdisch zu speichern. Daher gilt auch für den Verkehr, dass bis zur Mitte des Jahrhunderts eine vollständige Abkehr von der Nutzung fossiler Kraftstoffe erforderlich ist.

Vorabfassung - wird durch die endgültige Fassung ersetzt.

Vorabfassung - wird durch die endgültige Fassung ersetzt.

Erdgasantriebe als Brückentechnologie?

112. Mit Blick auf die mittelfristigen Klimaziele für den Verkehrssektor (Tz. 95 ff.) werden erdgasbetriebene Fahrzeuge oftmals als Option genannt, die einen Beitrag zur Emissionsreduktion leisten kann und die es deshalb regulatorisch zu fördern gelte. Durch einen Umstieg auf – im Vergleich zu Benzin und Diesel weniger kohlenstoffintensives – fossiles Erdgas als Energieträger ließen sich die Treibhausgas- und Schadstoffemissionen des Verkehrs in gewissem Umfang mindern. Das spezifische Treibhausgas-Einsparpotenzial liegt bei maximal etwa 15 bis 20 %, wobei dieser Wert maßgeblich von den Leckage-Mengen des ebenfalls klimaschädlichen Methans abhängt und für verschiedene Fahrzeugtypen variiert (KASTEN et al. 2016; BERGK et al. 2016; BÜNGER et al. 2014; WURSTER et al. 2014; HEIDT et al. 2013; HELMS et al. 2015, S. 44; DÜNNEBEIL et al. 2015). Dieser Maximalwert gilt für den Vergleich mit Benzinfahrzeugen, gegenüber Dieselfahrzeugen besteht aufgrund des geringeren energetischen Wirkungsgrads kein nennenswerter Klimavorteil. Das Einsparpotenzial bleibt somit weit hinter den längerfristigen klimapolitischen Notwendigkeiten (Tz. 11 ff.) zurück. Daher erscheinen groß angelegte staatliche Förderprogramme und umfangreiche Investitionen in den Umstieg auf gasbetriebene Verbrennungsmotoren im Straßenverkehr langfristig wenig zielführend und auch ökonomisch nicht sinnvoll. Mit Blick auf die anzustrebende vollständige Dekarbonisierung des Sektors droht zudem eine Fehllenkung von Investitionen (sunk investments). Bis die Investitionen voll zum Tragen kommen, wird das Treibhausgas-Einsparpotenzial erdgasbetriebener Fahrzeuge bereits den klimapolitischen Erfordernissen nicht mehr genügen. Daher sollte der Fokus der Technologieförderung stattdessen auf solche Antriebstechnologien gelegt werden, die mit dem Ziel einer vollständigen, nachhaltigen Dekarbonisierung vereinbar sind. Die Skepsis gegenüber der Kompatibilität des Gasantriebs mit diesem Ziel gilt auch bei Berücksichtigung der Möglichkeit zur Synthetisierung von Methan auf Basis erneuerbaren Stroms. Während diese Schlussfolgerungen für den Straßenverkehr – insbesondere für das Pkw-Segment – gelten, wird die Nutzung von LNG im Schiffsverkehr durchaus als aussichtsreiche Option zur Minderung von dessen Treibhausgas- und Schadstoffausstoß angesehen (vgl. Abschn. 4.3.4).

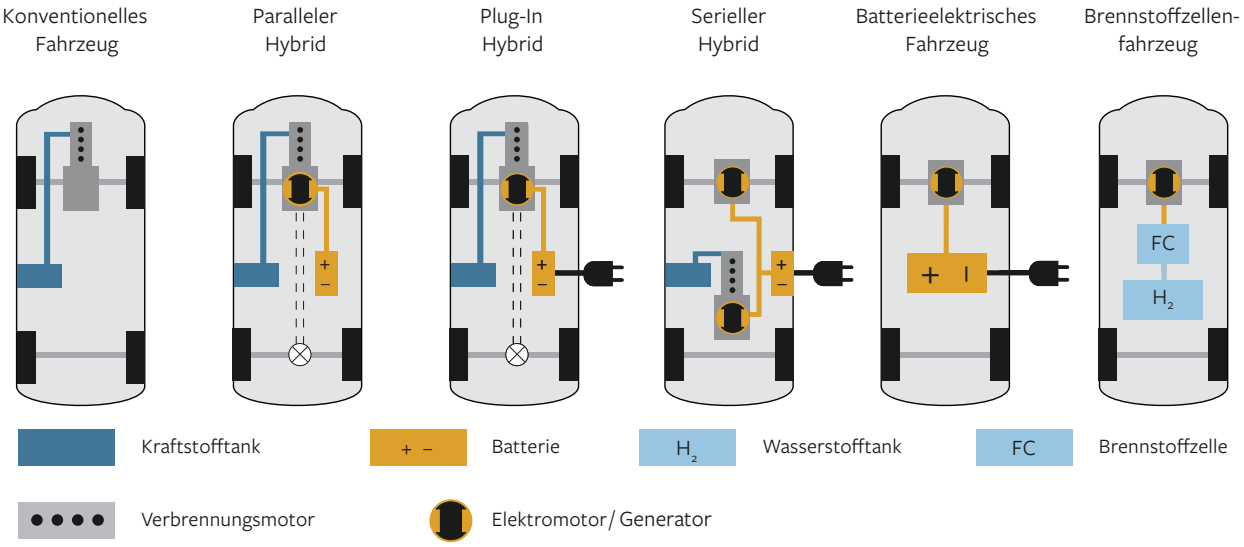
113. Für die Dekarbonisierung des Verkehrs verbleiben hinsichtlich der Energiebereitstellung somit grundsätzlich zwei Optionen. Einerseits können Kraftstoffe biogenen Ursprungs verwendet werden, das heißt flüssige Biokraftstoffe oder Biogas. Andererseits können Strom bzw. strombasierte Energieträger zum Einsatz kommen. Die Nutzung von Biokraftstoffen aus Anbaubiomasse führt zu Nutzungskonkurrenzen (mit der Nahrungsmittelproduktion sowie der stofflichen Nutzung) und ist oftmals weder sozial noch ökologisch nachhaltig (SRU 2007; Renewable Fuels Agency 2008; OECD 2007; SMITH und SEARCHINGER 2012; SMITH et al. 2012; PLEVIN und KAMMEN 2013; CAMPBELL und DOSWALD 2009). Biokraftstoffe aus Reststoffen sind zwar ökologisch weniger kritisch, jedoch ist ihr Mengenpotenzial begrenzt (SCHMIED et al. 2015, S. 49 ff.). Sie können so letztlich nur eine Ergänzung des Energiemixes für einen weitestgehend treibhausgasneutralen Verkehr darstellen.

114. Die Energieversorgung des Verkehrs muss somit zukünftig größtenteils auf der direkten und indirekten Nutzung elektrischen Stroms basieren. Für eine wirkliche Dekarbonisierung des Verkehrs über sektorale Bilanzgrenzen hinweg muss der verwendete Strom dabei klimaneutral erzeugt worden sein. Angesichts der Abkehr von der Atomkraft bis zum Jahr 2022 und der vielfältigen Hindernisse technischer, ökologischer, ökonomischer und gesellschaftlicher Natur für die CCTS-Technologie (CCTS – Carbon Capture, Transport and Storage) wird regenerativ erzeugter Strom künftig die maßgebliche Primärenergiequelle des Verkehrssektors sein – ebenso wie für weitere Energieverbrauchssektoren (vgl. Kap. 3).

Für den Einsatz erneuerbaren Stroms im Verkehrssektor stehen verschiedene Nutzungspfade offen, die sich unter anderem hinsichtlich der verwendeten Fahrzeugtechnologien unterscheiden. Abbildung 4-14 illustriert beispielhaft die wesentlichen alternativen Antriebstechnologien im Pkw-Segment. Für die Stromnutzung eignen sich mithin grundsätzlich mehrere Antriebsarten, die jeweils spezifische Vor- und Nachteile aufweisen. Diese Stärken und Schwächen beziehen sich unter anderem auf den Energieverbrauch, die Kosten, die Gesundheitsbelastungen, den Infrastrukturbedarf, die sogenannte Energiesystem-Dienlichkeit und den Rohstoffbedarf. Nachfolgend werden die nach derzeitigem Erkenntnisstand drei wichtigsten technologischen Alternativen knapp dargestellt und miteinander verglichen. Bei diesen handelt es sich um den direkt-elektrischen Antrieb, den Brennstoffzellenantrieb sowie um Verbrennungsmotoren auf Basis synthetischer Kraftstoffe. Zudem können verschiedene Antriebstechnologien in einem Fahrzeug kombiniert werden. Solche Hybridfahrzeuge kombinieren den batterieelektrischen Antriebsstrang mit einem Verbrennungsmotor oder – zukünftig – einer Brennstoffzelle.

Abbildung 4-14

Alternative Pkw-Antriebstechnologien



Quelle: Wirtschaftsministerium Baden-Württemberg et al. 2010, S. 6, überarbeitet

4.2.2.1 Direkte Elektrifizierung

115. Unter der direkten Elektrifizierung wird die unmittelbare Nutzung elektrischen Stroms zur Versorgung bzw. „Betankung" des Fahrzeugs verstanden. Die Energieversorgung der Fahrzeuge erfolgt direkt aus dem Stromnetz (oder über eine eigene Photovoltaikanlage). Im Fahrzeug selbst wird der Strom zunächst in einem elektrochemischen Speicher, das heißt einer Batterie, zwischengespeichert und dann im Fahrbetrieb ausgespeichert. Für Lkw ist auch eine direkte Versorgung des Fahrzeugs im Fahrbetrieb über Oberleitungen denkbar, wie sie für Züge im Schienenverkehr bereits seit langem etabliert ist. Für den Luftverkehr ist die direkte Elektrifizierung aufgrund der geringeren volumetrischen (auf das Volumen bezogenen) und gravimetrischen (auf die Masse bezogenen) Energiedichte von Batterien gegenüber Systemen aus Verbrennungsmotor und flüssigen Kohlenwasserstoffen derzeit keine realistische Option. Die benötigten Batterien wären zu groß und zu schwer; zudem wären lange Standzeiten für Ladevorgänge notwendig. Auch im Schiffsverkehr auf der Langstrecke sind batterieelektrische Antriebe aus ähnlichen Gründen wenig geeignet.

Hohe Effizienz der direkten Elektrifizierung

116. Die direkte Elektrifizierung von Kraftfahrzeugen zeichnet sich durch einen sehr hohen Gesamtwirkungsgrad (Well-to-Wheel-Wirkungsgrad), das heißt von der Primärenergiegewinnung bis zur Bereitstellung mechanischer Energie im Fahrzeug, aus (Abb. 4-15). Der Well-to-Wheel-Wirkungsgrad ergibt sich als Produkt von Well-to-Tank-Wirkungsgrad und dem Tank-to-Wheel-Wirkungsgrad.

Zum einen entstehen nur sehr geringe Verluste auf dem Weg der Primärenergie, das heißt dem erneuerbar erzeugten Strom, zum Fahrzeug: Da die Fahrzeuge direkt aus dem Stromnetz „betankt" werden, treten keine Verluste durch die Umwandlung des erneuerbaren Stroms in flüssige oder gasförmige Energieträger auf. Die direkte Elektrifizierung weist somit einen hohen Well-to-Tank-Wirkungsgrad auf. Zum anderen verfügen Elektromotoren über einen sehr hohen Tank-to-Wheel-Wirkungsgrad. Dieses Effizienzmaß beschreibt den Wirkungsgrad bei der Umwandlung von an das Fahrzeug übergebener Endenergie in mechanische Energie zur Fahrzeugfortbewegung. So ist der Tank-to-Wheel-Wirkungsgrad von batterieelektrischen Pkw etwa dreimal höher als der von Pkw mit Verbrennungsmotoren, wobei das exakte Wirkungsgradverhältnis durch eine Vielzahl von Faktoren beeinflusst wird (z. B. Außentemperaturen, Beschleunigungsprofil).

Für direkt-elektrisch betriebene Fahrzeuge wird im Vergleich der verschiedenen alternativen Antriebstechnologien daher die mit Abstand geringste Menge Primär-

Vorabfassung - wird durch die endgültige Fassung ersetzt.

strom benötigt, um eine bestimmte Strecke zurückzulegen. Mit Blick auf die Vorkette der Energieversorgung bedeutet dies auch weniger Umweltbelastungen und einen geringeren Rohstoffverbrauch für die Erzeugung des benötigten Primärstroms.

Wirkungen auf das Energiesystem

117. Beim Vergleich der Wirkungen der verschiedenen Antriebsarten auf die benötigten Stromerzeugungskapazitäten ist zu beachten, dass der Kapazitätsbedarf nicht notwendigerweise proportional zum Stromverbrauch der Fahrzeuge ansteigt. Wie in Kapitel 3 gezeigt, wird der Kapazitätsbedarf durch den Lastverlauf und auftretende Lastspitzen bestimmt. Um den Bedarf an zusätzlichen Erzeugungskapazitäten (und/oder Stromspeichern) abzuschätzen, müssen die Veränderungen des Lastverlaufs betrachtet werden, die mit der Elektrifizierung des Verkehrs einhergehen. Eine in diesem Zusammenhang zentrale Stellgröße ist die (zeitliche) Steuerung von Ladevorgängen. Würde ein Großteil der batterieelektrischen Pkw-Flotte während der ohnehin am Abend auftretenden Lastspitze geladen („Laden nach der Arbeit"), ginge die direkte Elektrifizierung mit einem hohen Ausbaubedarf einher. Würden die Fahrzeuge hingegen gezielt dann geladen, wenn das Angebot erneuerbaren Stroms hoch und die sonstige Stromnachfrage niedrig ist, wäre der zusätzliche Kapazitätsbedarf relativ gering. So müssen Fahrzeuge von Firmenflotten, wie beispielsweise Taxen, Mietwagen oder Postfahrzeuge, nicht systematisch zu einem bestimmten Zeitpunkt laden, sondern können ihren Ladebedarf zeitlich flexibel über den Tag verteilen. Würden die Fahrzeuge gezielt geladen, könnten sie zu einer verbesserten Integration volatiler erneuerbarer Energiequellen in das Stromsystem beitragen. Diese Integrationsfunktion gesteuerten Ladens betrifft insbesondere kurzfristige Schwankungen von Stromangebot und -nachfrage. Mit Blick auf saisonale Schwankungen bietet die direkte Elektrifizierung hingegen nur geringe Möglichkeiten.

Die positive (kurzfristige) Wirkung gesteuerten Ladens ließe sich durch eine bidirektionale Einbindung der Elektrofahrzeuge in das Elektrizitätssystem noch weiter verstärken: Würden batterieelektrische Fahrzeuge in Zeiten hoher Stromnachfrage und eines geringen Angebots an volatilem erneuerbaren Strom ins Netz zurückspeisen, würden weniger Stromerzeugungs- bzw. Speicherkapazitäten benötigt. In absehbarer Zeit werden diese bidirektionalen sogenannten Vehicle-to-Grid-Dienstleistungen jedoch voraussichtlich keinen nennenswerten Beitrag zur Integration volatiler erneuerbarer Energiequellen leisten können. Neben noch bestehenden technischen Herausforderungen erscheinen die mit Vehicle-to-Grid-Dienstleistungen erzielbaren Erlöse zu gering, um den damit verbundenen Komfortverlust (verminderte verfügbare Reichweite und geringere Flexibilität) und Risiken eines erhöhten Batterieverschleißes zu kompensieren (BISHOP et al. 2013; LOISEL et al. 2014; PASAOGLU et al. 2012; MULLAN et al. 2012; ARNOLD et al. 2016). Nichtsdestotrotz sollten die Möglichkeiten einer bidirektionalen Einbindung von Elektrofahrzeugen in das Stromnetz weiter erforscht werden. Zudem sollte der Ausbau der Ladeinfrastruktur so erfolgen, dass hierdurch ein systemdienliches Lademanagement technisch ermöglicht wird.

Infrastrukturbedarf

118. Das Ladeverhalten hat einen Einfluss auf die benötigte Infrastruktur für die Energieverteilung. Dies gilt insbesondere auch für die Stromverteilnetze. Bei ungesteuertem Laden würde die maximale Belastung der Verteilnetze deutlich ansteigen und somit erhebliche Investitionen in deren Ausbau bzw. in die Anpassung der Netzbetriebsmittel erforderlich machen. Der gleiche Zusammenhang gilt auch für die überregionalen Stromübertragungsnetze, wenn auch in geringerem Ausmaß. Überdies entstehen erhebliche Kosten für Infrastrukturinvestitionen in den Aufbau eines engmaschigen Netzes an Ladestationen. Investitionsbedarf besteht dabei nicht nur für öffentliche Lademöglichkeiten, sondern auch im privaten Bereich (bspw. in Wohn- und Bürogebäuden). Ohne eine dichte und qualitativ hochwertige (bspw. hinsichtlich der Ladezeiten) Versorgungsstruktur wird die Elektromobilität keine breite Akzeptanz finden (s. Tz. 250 ff.).

Kosten

119. Für die Verbraucherinnen und Verbraucher sind batterieelektrische Fahrzeuge derzeit noch signifikant teurer als solche mit Verbrennungsmotor, insbesondere aufgrund hoher Batteriekosten. Die Kosten fallen jedoch beständig und es sind weiterhin substanzielle Kostensenkungen zu erwarten (vgl. Abb. 4-21). Die Kostenunterschiede werden dabei auch von der bereitgestellten elektrischen Reichweite bestimmt. Um rein elektrische Reichweiten zu erreichen, die mit denen heutiger Fahrzeuge mit Verbrennungsmotor vergleichbar sind, wären sehr große, schwere und teure Batterien notwendig. Beschränkt sich die rein elektrische Reichweite auf den alltäglichen Bedarf, reduzieren sich die Kostenunterschiede massiv. Eine Kostengleichheit batterieelektrischer Fahrzeuge mit verbrennungsmotorischen Fahrzeugen wird für Mitte der 2020er-Jahre erwartet (ING Economics Department 2017; BNEF 2017; WOLFRAM

Vorabfassung - wird durch die endgültige Fassung ersetzt.

und LUTSEY 2016), wobei der Zeitpunkt von einer Vielzahl Parameter (u. a. elektrische Reichweite, Effizienz- und Abgasanforderungen an verbrennungsmotorische Fahrzeuge) beeinflusst wird. Im Vergleich zu Brennstoffzellenfahrzeugen sind batterieelektrische Fahrzeuge allerdings heute und erwartbar auch in der Zukunft deutlich günstiger.

Die Gesamtkosten für die Nutzenden ergeben sich nicht nur aus den Anschaffungskosten für das Fahrzeug, sie werden auch maßgeblich durch die Energiekosten in der Nutzungsphase bestimmt. Diese liegen aufgrund des hohen Wirkungsgrads bei batterieelektrischen Antrieben unterhalb derer anderer Antriebstechnologien. Der Unterschied der Energiekosten zwischen den Antriebsarten wird maßgeblich von der Belastung der verschiedenen Energieträger mit Steuern und Abgaben beeinflusst (s. Tz. 207 ff.). Aus Nutzersicht könnten batterieelektrische Fahrzeuge bereits in der kommenden Dekade zur kostengünstigsten Technologie werden. Auch in einer gesamtwirtschaftlichen Langfristperspektive, welche die kumulierten Kosten bis 2050 sowohl für die Fahrzeuge als auch die Energieversorgung (Energieerzeugung und Infrastruktur für die Energieverteilung) umfasst, erscheint die direkte Elektrifizierung als günstigster Dekarbonisierungspfad (KASTEN et al. 2016).

Rohstoffbedarf

120. Hinsichtlich des Rohstoffbedarfs werden für die Antriebskomponenten Batterie, Leistungselektronik und Elektromotor andere Materialien benötigt als für konventionelle Antriebe (s. Abb. 4-17). Gleichzeitig fallen – bei reinem Elektroantrieb – Komponenten wie Tank, Katalysator oder Auspuffanlage weg. Hybridfahrzeuge mit beiderlei Antrieben haben dementsprechend einen höheren Rohstoffbedarf, da alle Komponenten vorgehalten werden müssen.

Batterien werden derzeit vor allem auf Basis von Lithium-Metalloxiden gefertigt und erreichen für vollelektrische Pkw Gewichte von bis zu 300 kg (ELWERT et al. 2016). Als Aktivmaterialien der Kathode werden hauptsächlich Nickel-Kobalt-Mangan-Verbindungen, Nickel-Kobalt-Aluminium-Verbindungen oder Lithium-Eisenphosphat-Verbindungen eingesetzt (HELMS et al. 2016). In der Leistungselektronik finden neben Aluminium, Eisen und Kupfer auch Kleinmengen an Zinn, Gold, Silber, Gallium, Indium, Tantal, Niob, Germanium und Palladium Verwendung (BUCHERT et al. 2011b; BULACH et al. 2017). Für den Elektromotor werden in der Regel Permanentmagnete verwendet, für die verschiedene Seltene Erden – insbesondere Neodym, Dysprosium, Praseodym – benötigt werden.

Zwischenfazit

121. Die direkte Elektrifizierung weist den mit Abstand höchsten energetischen Wirkungsgrad auf. Neben ihrer hohen Effizienz liegt ein weiterer Vorteil von direkt-elektrischen Fahrzeugen darin, dass sie (lokal) emissionsfrei betrieben werden, da keine Schadstoffe wie bei der Verbrennung von Kohlenwasserstoffverbindungen entstehen. Für den Straßenverkehr lässt sich festhalten, dass die direkte Elektrifizierung in der Nutzungsphase mit Blick auf Energieverbrauch und Gesundheitsaspekte im Antriebsvergleich sehr gut abschneidet. Die Rohstoffnachfrage verschiebt sich für Elektroantriebe weg von Erdöl und Platingruppenmetallen hin zu Kupfer, Lithium und Seltenen Erden.

4.2.2.2 Elektrifizierung mittels Wasserstoff und Brennstoffzelle

122. Brennstoffzellenfahrzeuge werden ebenfalls von Elektromotoren angetrieben. Die Energie wird dabei jedoch nicht in einer Batterie gespeichert, sondern in Form von Wasserstoff, der relativ schnell nachgetankt werden kann. In der Brennstoffzelle reagiert der Wasserstoff mit Sauerstoff zu Wasserdampf, wobei elektrische Energie frei wird. Diese wird direkt dem Elektromotor bzw. einer Batterie mit kleiner Kapazität zur Zwischenspeicherung zugeführt. Über den Wasserdampf hinaus entstehen keine weiteren Abgase, sodass auch diese Antriebsform lokal schadstofffrei ist. Wasserstoff kann grundsätzlich auch in angepassten Verbrennungsmotoren genutzt werden. Wegen des geringeren Tank-to-Wheel-Wirkungsgrads dieses Pfades wird diese Option aber hier nicht weiter betrachtet.

Effizienznachteile gegenüber der direkten Elektrifizierung

123. Im Vergleich zur direkten Elektrifizierung ist die indirekte Elektrifizierung über den Wasserstoffpfad in einer Well-to-Wheel-Perspektive energetisch deutlich ineffizienter. Verglichen mit einem batterieelektrischen Pkw wird mit einem Brennstoffzellenfahrzeug für die gleiche Fahrleistung mindestens die doppelte Menge Primärstrom benötigt bzw. es lässt sich bei gleichem Stromeinsatz nur eine etwa halb so lange Strecke zurücklegen (Abb. 4-16). Dieser Mehrverbrauch kann sich je nach Struktur der Wasserstoffversorgung auch auf mehr als das Dreifache erhöhen (KASTEN et al. 2013).

Vorabfassung - wird durch die endgültige Fassung ersetzt.

Zusätzliche energetische Verluste gegenüber der direkten Elektrifizierung treten auf

- bei der Elektrolyse zur Wasserstoffgewinnung,
- bei dem Transport des Wasserstoffs und der Verdichtung auf Tankstellendruck,
- bei der Rückverstromung in der Brennstoffzelle.

Lastglättungsfunktion durch Speicherbarkeit von Wasserstoff

124. Dem geringeren Wirkungsgrad entsprechend steigt auch der Bedarf an Stromerzeugungskapazitäten bei einer Elektrifizierung über den Wasserstoffpfad verglichen mit der direkten Elektrifizierung. Durch die zusätzliche Flexibilität einer zeitlichen Entkopplung von Wasserstoffproduktion und -verbrauch steigt der Kapazitätsbedarf allerdings nicht proportional zum erhöhten Primärstromverbrauch. Die Elektrolyse von Wasserstoff kann dann erfolgen, wenn große Mengen erneuerbaren Stroms eingespeist werden und die Stromnachfrage gering ist. In Zeiten eines relativ knappen Stromangebots würde dann kein Wasserstoff produziert. Ferner kann der produzierte Wasserstoff auch mit Erdgas vermischt gespeichert und anderen Verwendungen zugeführt werden. Damit kann die Wasserstoffproduktion zur (saisonalen) Lastglättung beitragen und eine wichtige Energiesystemdienstleistung erbringen.

Diese Lastglättungsfunktion kann den höheren Primärstromverbrauch jedoch nicht kompensieren. Die Menge benötigter Stromerzeugungskapazitäten wird bei einer indirekten Elektrifizierung mittels Brennstoffzellenfahrzeugen deutlich ansteigen – mit entsprechenden Folgen für Umweltbeanspruchung und Rohstoffeinsatz. Dies gilt insbesondere für den Fall einer großflächigen indirekten Elektrifizierung, da der (zusätzliche) Nutzen der Lastglättungsfunktion mit der Menge der Wasserstoffproduktion abnimmt.

Die „Umleitung“ begrenzter Mengen erneuerbar erzeugten Stroms über den Wasserstoffpfad kann somit grundsätzlich eine sinnvolle Ergänzung der direkten Elektrifizierung zur Pufferung von Stromproduktions- und -nachfrageüberhängen darstellen. Bei der Bewertung dieser Option gilt es, den energiesystemischen Nutzen den damit verbundenen Kosten gegenüberzustellen. Die Anschaffung der Elektrolyseure geht mit hohen Anfangsinvestitionen einher. Kommen die Elektrolyseure dann lediglich bei vergleichsweise seltenen Einspeisespitzen zum Einsatz und erreichen mithin nur geringe Volllaststunden, steigen die Kosten je Kilogramm produzierten Wasserstoffs stark an. Es zeigt sich somit ein Zielkonflikt zwischen Energiesystemdienlichkeit und Kosteneffizienz. Dies gilt auch für die Elektrolyseure selbst, da besonders flexibel fahrbare Elektrolyseure eine geringere Produktionseffizienz aufweisen. Inwieweit die Nutzung von Wasserstoff im Verkehrssektor letztlich sinnvollerweise zur Lastglättung beitragen kann, hängt auch davon ab, welche Flexibilitätsoptionen in anderen Sektoren bereitgestellt werden (vgl. Kap. 3).

Infrastrukturbedarf

125. Eine Wasserstoffinfrastruktur ist bisher nur in Ansätzen vorhanden (s. Tz. 264). Für den großflächigen Einsatz der Brennstoffzellentechnologie wäre der relativ kostenintensive Aufbau einer Tankstellen- und gegebenenfalls Pipeline-Infrastruktur notwendig. Der insgesamt höhere Stromverbrauch geht auch mit einem Anstieg der benötigten Stromübertragungskapazitäten einher. Wird der Wasserstoff vor Ort an der Tankstelle erzeugt, kann auch eine gezielte Verstärkung des Verteilnetzes notwendig werden. Würden Brennstoffzellenfahrzeuge nur für bestimmte Einsatzzwecke (z. B. Taxis, Lkw) eingesetzt, würde dies einen geringeren Infrastrukturbedarf bedeuten.

Kosten

126. Bisher liegen die Kosten von Brennstoffzellenfahrzeugen deutlich oberhalb derer von batterieelektrischen und weit oberhalb derer von Fahrzeugen mit Verbrennungsmotor. Vor allem bedingt durch die hohen Fahrzeugkosten wird die Wasserstoffmobilität auch mit Blick auf die langfristigen Gesamtsystemkosten derzeit als wenig wirtschaftliche Alternative bewertet (KASTEN et al. 2016). Zwar ist für die Zukunft eine deutliche Kostendegression zu erwarten, inwieweit Brennstoffzellenfahrzeuge kostenseitig mit den anderen alternativen Antriebsarten konkurrieren können, ist derzeit aber noch nicht absehbar.

Rohstoffbedarf

127. Ebenso wie das batterieelektrische Fahrzeug werden für den Antrieb eines Brennstoffzellenfahrzeuges Rohstoffe für den Elektromotor (Kupfer, Neodym, Dysprosium), eine (jedoch kleinere) Batterie (Lithium, Metalloxide) als Zwischenspeicher und die notwendige Leistungselektronik (Kupfer, Edel- und Sondermetalle) benötigt. Zusätzlich sind die Brennstoffzelle selbst und der Wasserstofftank Teile des Antriebssystems, für die Rohstoffe benötigt werden. Innerhalb der Brennstoffzelle wird Platin als Katalysator eingesetzt.

Vorabfassung - wird durch die endgültige Fassung ersetzt.

Zwischenfazit

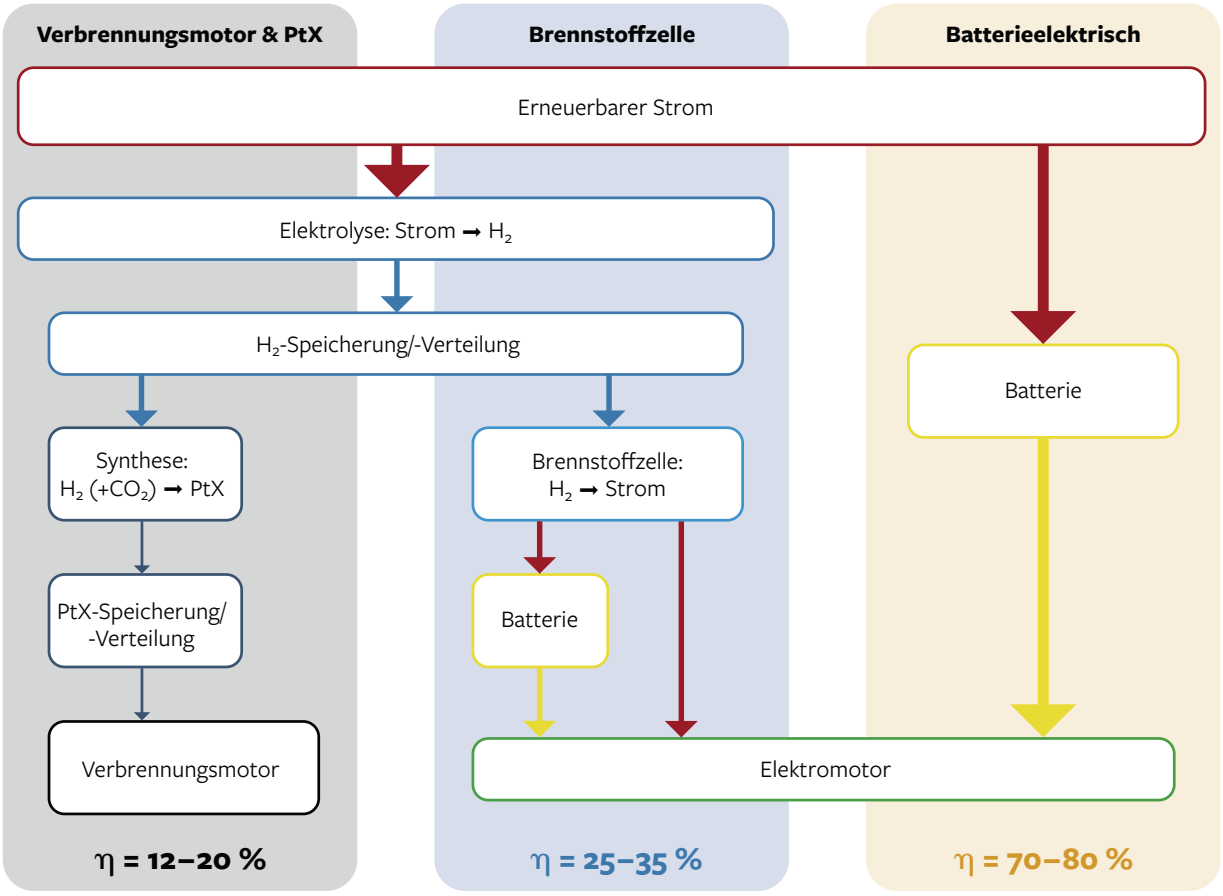
128. Derzeit ist davon auszugehen, dass die breite Substitution des fossilen Verbrennungsmotors durch die Brennstoffzelle sowohl ökonomisch als auch energetisch wenig effizient ist. Brennstoffzellenfahrzeuge können aber eine sinnvolle Ergänzung im Technologiemix für bestimmte Anwendungsfelder und Nutzungsprofile bilden. Dies gilt vor allem für den Straßenverkehr und hier in stärkerem Maße für den Güterverkehr. Zudem können (kleinere) Brennstoffzellen und Wasserstofftanks auch als Ergänzung von batterieelektrischen Antrieben zum Einsatz kommen, um deren Reichweite zu erhöhen („Wasserstoff Range Extender"). Für Brennstoffzellenfahrzeuge wird neben Kupfer, Lithium und Seltenen Erden vor allem der Bedarf an Platin steigen.

4.2.2.3 Einsatz synthetischer Kraftstoffe im Verbrennungsmotor

129. Eine weitere Variante der indirekten Elektrifizierung ist die Synthetisierung von Kohlenwasserstoffen mittels erneuerbaren Stroms. Ausgangsstoffe hierfür sind durch Elektrolyse produzierter Wasserstoff und CO_2. Hieraus können über verschiedene chemische Verfahren flüssige Kohlenwasserstoffe oder auch Methan synthetisiert werden. Diese werden, wie heute üblich, in Verbrennungsmotoren verbrannt, wobei das CO_2 wieder freigesetzt wird. Um das Ziel eines vollständig dekarbonisierten Energiesystems zu erreichen, darf das im chemischen Prozess eingesetzte CO_2 nicht fossilen Ursprungs sein. Es könnte beispielsweise aus Biogasanlagen stammen oder in Zukunft der Luft entnommen werden, was allerdings deutlich energieaufwendiger ist.

Abbildung 4-15

Energetischer Gesamtwirkungsgrad (h) verschiedener Antriebsoptionen

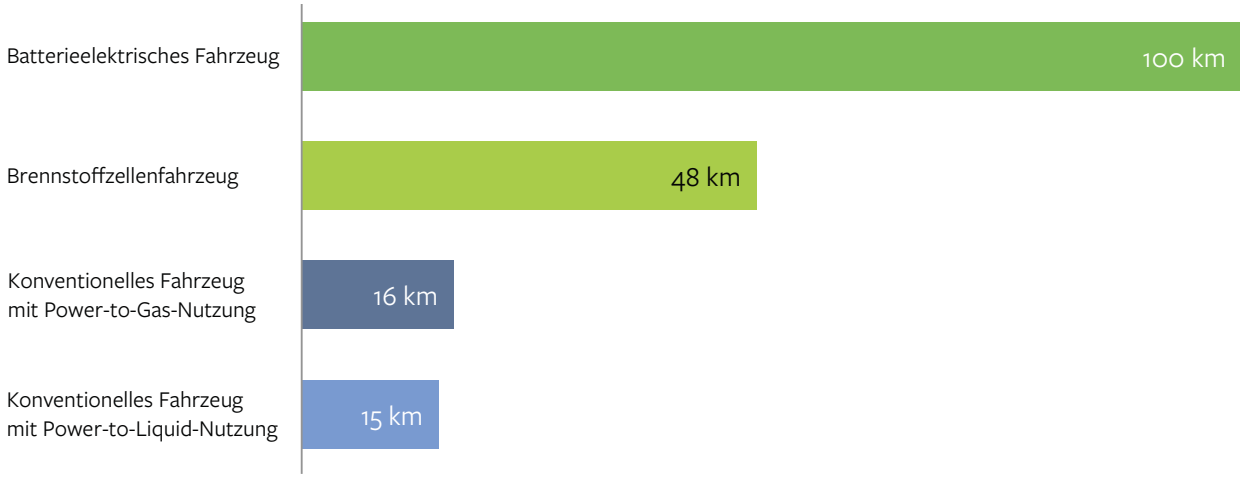


SRU 2017

Vorabfassung - wird durch die endgültige Fassung ersetzt.

Abbildung 4-16

Reichweite von Pkw mit unterschiedlichen Technologien (bei 15 kWh Primärenergieeinsatz)



SRU 2017; Datenquelle: KREYENBERG et al. 2015, S. 15

Geringer Wirkungsgrad

130. Obgleich der Well-to-Wheel-Wirkungsgrad (energetischer Gesamtwirkungsgrad) dieses Dekarbonisierungspfades – ebenso wie jener der anderen betrachteten Pfade – von einer Vielzahl verschiedener Faktoren abhängt und zwischen verschiedenen Studien signifikant variiert, ist er im Vergleich mit anderen Optionen unzweifelhaft sehr gering (s. Abb. 4-15). Neben den Umwandlungsverlusten bei der Wasserstoffelektrolyse treten weitere Verluste bei der Synthetisierung der Kohlenwasserstoffe auf. Zudem weisen Verbrennungsmotoren im Realbetrieb einen Wirkungsgrad auf, der zurzeit häufig weniger als 30 % beträgt. Der Tank-to-Wheel-Wirkungsgrad von Fahrzeugen mit Verbrennungsmotor liegt damit – trotz noch bestehender Optimierungspotenziale unter anderem durch Hybridisierung – weit unterhalb jenem von direkt-elektrischen und auch unterhalb jenem von Brennstoffzellenfahrzeugen.

Der Primärstromverbrauch – bei gegebener Fahrleistung – des PtX-Technologiepfades beträgt damit etwa das Doppelte des Brennstoffzellenpfades und mindestens das Vier- bis Fünffache der direkten Elektrifizierung. Umgekehrt ist die mit einer gegebenen Menge erneuerbaren Stroms zurücklegbare Fahrstrecke dementsprechend geringer (Abb. 4-16). Da in Abbildung 4-16 eine Gewinnung des CO_2 zur Kraftstoffsynthetisierung aus der Luft zugrunde gelegt wird, ergibt sich ein für verbrennungsmotorische Fahrzeuge besonders ungünstiges Reichweitenverhältnis.

Gute Speicherbarkeit, geringe heimische Potenziale

131. Flüssige und gasförmige Kohlenwasserstoffe lassen sich gut speichern. Daher ermöglichen sie eine weitgehende zeitliche Entkopplung von Herstellung und Verbrauch. Die Synthetisierung von Kohlenwasserstoffen kann somit im Prinzip die Einbindung volatiler erneuerbarer Energien erleichtern und zur Stabilisierung des Energiesystems beitragen. Dieser Effekt wird jedoch von der energetischen Ineffizienz dieses Nutzungspfades weit überkompensiert. Aufgrund der sehr hohen Verluste entlang der Energiebereitstellungskette würde die alleinige Versorgung des Verkehrssektors mit synthetischen Kraftstoffen den Bedarf an Stromerzeugungskapazitäten vervielfachen und die heimischen Potenziale der Erneuerbaren klar übersteigen. Würden größere Mengen synthetischer Kraftstoffe in Deutschland nachgefragt, müssten diese im Ausland – an sogenannten Gunststandorten – produziert und importiert werden. Dadurch würden sich neben Fragen der Versorgungssicherheit auch solche zur Nachhaltigkeit und sogenannten Zusätzlichkeit (d. h. keine Verdrängung der lokalen Nutzung erneuerbarer Energien) der importierten Kraftstoffe stellen.

Geringe Umstellungs-, hohe Folgekosten

132. Für die Nutzung synthetischer Kraftstoffe in Verbrennungsmotoren sind keine größeren Veränderungen an der derzeit vorherrschenden Fahrzeugtechnologie notwendig. Auch kann die bestehende Tankstelleninfrastruk-

Vorabfassung - wird durch die endgültige Fassung ersetzt.

tur genutzt werden. Während an dieser Stelle somit nur geringe zusätzliche Kosten entstünden, spricht der enorm hohe Primärstromaufwand dieses Dekarbonisierungspfades – auch kostenseitig – gegen dessen großflächige Umsetzung.

Angesichts dessen, dass auch die Produktion erneuerbaren Stroms mit verschiedenen Umweltbelastungen einhergeht, stellt der geringe Wirkungsgrad einen weiteren gravierenden ökologischen Nachteil dieses Technologieansatzes dar. Zudem entstehen bei der Verbrennung von synthetischen Kraftstoffen – ebenso wie bei Biokraftstoffen – gesundheitsschädliche Emissionen (bspw. NO_x), wenn auch in geringerem Umfang als bei fossilen Kraftstoffen. Letztlich ginge die großflächige Umstellung auf synthetische Kraftstoffe bei Beibehaltung des Verbrennungsmotors mit dauerhaft hohen finanziellen Kosten sowie erheblichen Umwelt- und Gesundheitsbelastungen einher.

Rohstoffbedarf

133. Für die Herstellung des Antriebs ändert sich der Rohstoffbedarf gegenüber dem derzeitigen Status nicht, da weiterhin konventionelle Verbrennungsmotoren genutzt werden können. Mit dem enorm hohen Strombedarf für die Produktion synthetischer Kraftstoffe geht jedoch auch ein sehr hoher Rohstoffbedarf für den Bau der Erneuerbaren-Energien-Anlagen einher. Überdies stellt sich die Frage nach einer nachhaltigen Versorgung mit CO_2, das für die Synthetisierung der Kohlenwasserstoffe benötigt wird. Nur wenn das eingesetzte CO_2 nicht fossilen Ursprungs ist, sind die synthetischen Kraft-

Tabelle 4-6

Rohstoffbedarf für Systemkomponenten von konventionellen, batterieelektrischen oder Antrieben mit Brennstoffzellen 2010

	Gold	Silber	Kupfer	Gallium	Indium	Germanium	Platin	Palladium	Neodym	Praseodym	Dysprosium	Terbium	Lithium	Kobalt
Elektromobiler Antrieb														
Elektromotor			○	•					○	○	○	○		
Leistungselektronik	•	○	○	•	•	•		•						
Lithium-Ionen-Batterie			○										○	○
Kabel			○											
Brennstoffzellenkomponenten (Systemmodul, Stack, H_2-Tank)			○	•			○		○	○	○	○		
Ladestation/-säule inkl. Ladekabel		•	○	•	•	•								
Antriebsunabhängige Komponenten														
Standardverkabelung Auto		○	○											
Weitere Elektroanwendungen (Lenkung, Bremsen, Elektronik)			○											
Konventioneller Antrieb														
Antriebskomponenten (Motor, Lichtmaschine, Katalysator)			○				○	○						

○ = Einsatz im kg-Bereich je PKW ○ = Einsatz im g-Bereich je PKW • = Einsatz im mg-Bereich je PKW

Quelle: BUCHERT et al. 2011a; ergänzt durch TREFFER 2011, überarbeitet

Vorabfassung - wird durch die endgültige Fassung ersetzt.

stoffe tatsächlich CO_2-neutral. Infrage kommen hierfür insbesondere CO_2 aus der Nutzung von (nachhaltig produzierter bzw. Abfall-)Biomasse oder die (sehr energieaufwendige) Abscheidung von CO_2 aus der Luft.

Zwischenfazit

134. Die Nutzung von synthetischen Kraftstoffen sollte auf jene Einsatzfelder beschränkt werden, die für eine direkte Elektrifizierung (und ggf. den Einsatz von Brennstoffzellen) ungeeignet sind. Dies sind in erster Linie der Luftverkehr und auch der Seeverkehr. Hier sind die guten volumetrischen und gravimetrischen Eigenschaften synthetischer Kraftstoffe von besonderer Bedeutung. Auch im Straßengüterverkehr und gegebenenfalls als Kraftstoff für Range Extender von Pkw ist ein sparsamer Einsatz denkbar.

4.2.2.4 Rohstoffe als Bremsfaktor für neue Technologien?

135. Der Ausbau neuer Technikpfade kann zu Herausforderungen führen, die sich als Hemmnis oder gar Begrenzung erweisen können. Neben Fragen der technischen Machbarkeit, der gesellschaftlichen Bereitschaft für einen Wandel und ökonomischen Grenzen stellt sich auch die Frage, ob ausreichende Mengen an Rohstoffen in einem engen Zeitraum für die Verallgemeinerbarkeit einer Technologie verfügbar sind. Die Verfügbarkeit von Primärrohstoffen hängt dabei von geologischen und politischen Rahmenbedingungen ab, vom Stand der Exploration und Förderkapazitäten, ebenso wie von wirtschaftlichen, sozialen und ökologischen Begrenzungen (s. Abschn. 2.3.2 u. 3.5.4). Das Angebot an Sekundärrohstoffen wird dagegen von den Mengen, die für das Recycling zur Verfügung stehen, von Techniken der Aufbereitung, der Gesamtumweltbilanz und der Wirtschaftlichkeit im Vergleich mit Primärrohstoffen begrenzt. Welche Rohstoffe in welchen Mengen wann für den Verkehrssektor nachgefragt werden, wird von einer Vielzahl von Faktoren bedingt. Die Entwicklung der Verkehrsleistung, das Flottenwachstum, die Anteile der Verkehrsträger, die Marktanteile der Antriebstechnologien und die Weiterentwicklung der Technik beeinflussen die Nachfrage erheblich. Auch die rein technischen Varianten der Antriebstechnik unterscheiden sich deutlich in ihrer rohstofflichen Zusammensetzung. Eine Einschätzung der Rohstoffbedarfe ist mit großen Unsicherheiten behaftet, da sich die Faktoren auch gegenseitig beeinflussen. In verschiedenen Studien wurden entsprechende Betrachtungen gemacht, die aufgrund unterschiedlich gewählter Variablen und Systemgrenzen jeweils Ausschnitte abbilden.

Rohstoffe für den dekarbonisierten Verkehrssektor

136. Die Zusammensetzung von Fahrzeugen mit Verbrennungsantrieb hat sich durch die Veränderungen der Karosseriewerkstoffe und die Zunahme von Elektronik kontinuierlich verändert (SCHMID und ZUR-LAGE 2014). Fahrzeuge mit alternativen Antrieben weisen demgegenüber erhebliche Unterschiede durch andere Komponenten auf. Tabelle 4-6 zeigt einen Überblick über spezifische Komponenten und dafür notwendige Rohstoffe für batterieelektrische Fahrzeuge und Brennstoffzellenfahrzeuge im Vergleich zu herkömmlichen Fahrzeugen mit Verbrennungsmotor. Bisher nicht in Fahrzeugen benötigt wurden die Seltenerdmetalle Neodym, Praseodym, Dysprosium und Terbium – sie werden sowohl für batterieelektrische als auch für Brennstoffzellenfahrzeuge verwendet. Platin, das in Fahrzeugen mit Verbrennungsmotor im Katalysator eingesetzt wird, wird in batterieelektrischen Fahrzeugen nicht benötigt, jedoch für Brennstoffzellen. Kupfer wird für sämtliche neue Komponenten verwendet; in der Leistungselektronik gemeinsam mit Gold, Silber, Gallium, Indium, Germanium und Palladium (BUCHERT et al. 2011a). Für die Batterien werden erhebliche Mengen an Lithium und Kobalt benötigt (TREFFER 2011).

Weiterhin ändert sich das Material für die Karosserie. Während bisher in der Regel verzinktes Stahlblech genutzt wurde, werden zukünftig vermehrt Leichtbauweisen zum Einsatz kommen (s. Tz. 152).

Die Bedarfe für die Metalle Neodym, Praseodym, Dysprosium, Terbium, Indium, Gallium, Germanium, Gold, Silber, Kupfer, Platin und Palladium wurden für unterschiedliche globale Szenarien und Ausbaupfade des Mobilitätssektors analysiert (BUCHERT et al. 2011a). Die Verfügbarkeit der folgenden Rohstoffe wurde als kritisch bewertet:

- Seltene Erden, insbesondere Dysprosium,
- Gallium, weil verschiedene Technologien zunehmend darum konkurrieren,
- Indium und Germanium, die zwar für die Elektromobilität nicht entscheidend sind, aber aufgrund hoher Wachstumsraten in anderen Anwendungen und ihrer Gewinnung als Koppelprodukte knapp werden könnten.

137. Speziell für die Komponenten Batterie und Brennstoffzelle sind Nachfragesteigerungen für Lithium, Ko-

Vorabfassung - wird durch die endgültige Fassung ersetzt.

balt, Nickel, Grafit und Platin zu erwarten. Rein geologisch begründete Verknappungen werden für keinen dieser Rohstoffe erwartet. Es kann jedoch zu temporären Einschränkungen zum Beispiel aufgrund von Exportbeschränkungen, Krisen und Kriegen, monopolartiger Versorgungsstrukturen, (ökologischen, sozialen und wirtschaftlichen) Grenzen beim Ausbau der Förderung oder einer Kopplung an die Förderung anderer Rohstoffe kommen (Öko-Institut 2017).

138. Auch andere Zukunftstechnologien verwenden zunehmend neue Rohstoffarten und treten in Konkurrenz (MARSCHEIDER-WEIDEMANN et al. 2016). Unter diesem Blickwinkel wird der Mobilitätssektor als rohstoffintensiv eingestuft für:

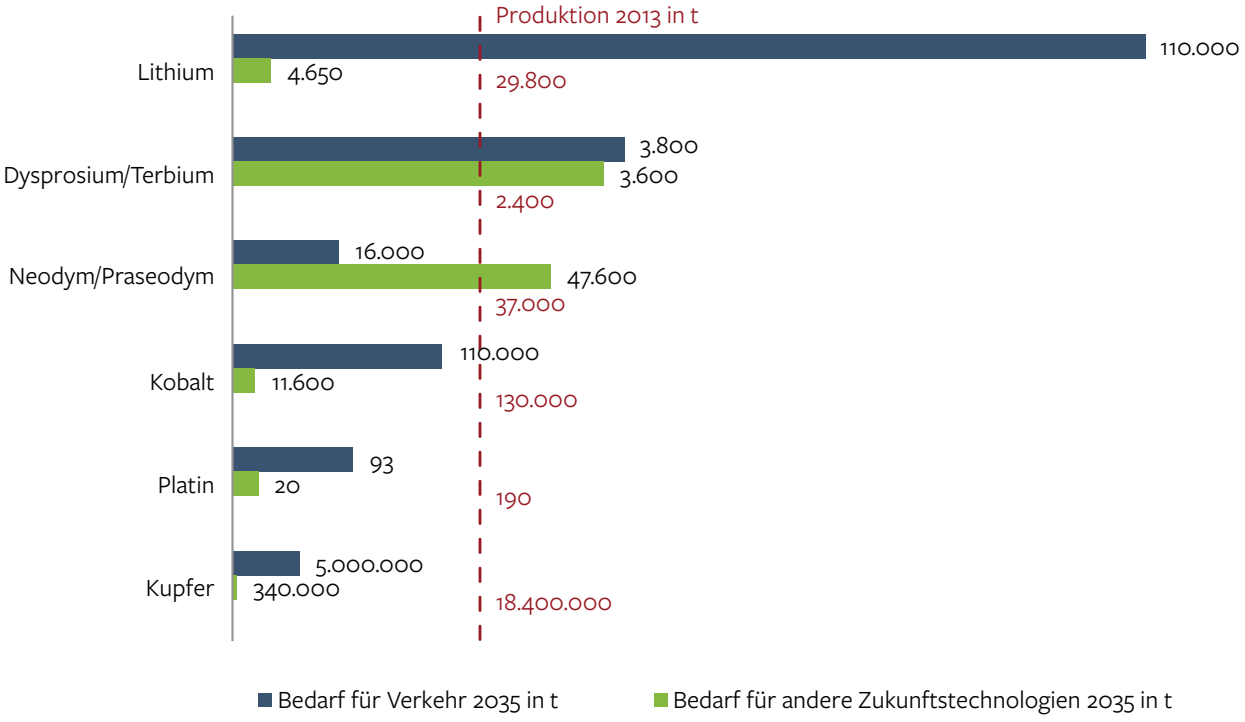
- Neodym, Dysprosium, Praseodym, Terbium, Kupfer (elektrische Traktionsmotoren für batterieelektrische, Hybrid- und Brennstoffzellenfahrzeuge),
- Platin (Brennstoffzelle),
- Lithium, Kobalt, Mangan (Li-Ionen-Akkumulatoren für Pkw).

139. Auch für die europäische Ebene wurde untersucht, welche Rohstoffe zu einem Nadelöhr für die Entwicklung von Windenergie, Photovoltaik und Elektromobilität werden könnten. Ohne Anpassungsmaßnahmen wie Substitution und Effizienzsteigerung werden Neodym, Praseodym, Kobalt, Grafit und Lithium als Engpassmaterialien für 2030 genannt. Diese Anpassungsmaßnahmen vorausgesetzt werden Lithium, Dysprosium, Grafit und Kobalt nicht mehr ganz so hohe Versorgungsrisiken bergen (BLAGOEVA et al. 2016).

140. Untersuchungen zur Rohstoffnachfrage innerhalb Deutschlands weisen eine Steigerung des Gesamtrohstoffeinsatzes bis 2030 für Deutschland auf, dominiert von Massenmetallen (Stahl, Aluminium etc.). Stahl wird bis 2050 unter der Annahme, dass zunehmend Leichtbauweisen (Zuwachs an Aluminium und Polymeren) angewendet werden (zu Leichtbauweisen s. a. Tz. 152) jedoch an Bedeutung verlieren. Die Zunahme der Elektromobilität wird zu einem wachsenden Bedarf an Kupfer, Nickel, Lithium und Seltenen Erden führen. Aufgrund der hohen Unsicherheiten wird keine Aussage zu Kritikalitäten getroffen (Öko-Institut et al. 2016).

Abbildung 4-17

Bedarf an Lithium, Dysprosium, Terbium, Neodym, Praseodym, Kobalt, Platin und Kupfer für den Verkehrssektor im Vergleich zu anderen ausgewählten Zukunftstechnologien im Jahr 2035



SRU 2017, Datenquelle: MARSCHEIDER-WEIDEMANN et al. 2016, S. 259 ff.

Vorabfassung - wird durch die endgültige Fassung ersetzt.

141. Eine Materialintensitätsanalyse für den Sektorbereich Pkw hat den abiotischen Materialbedarf unterschiedlicher Mobilitätsstrategien verglichen. Im Ergebnis wird die Verfügbarkeit für Neodym und Praseodym als unkritisch angesehen, im Gegensatz zu Dysprosium und Terbium. Kritisch wird auch der hohe Lithiumbedarf für den Bestandsaufbau von Elektro-Pkw bewertet (FRIESKE et al. 2014).

142. Einig sind sich die Studien weitgehend in der Risikobewertung für Seltene Erden. Auch Kobalt und Lithium werden mehrfach genannt. Eine Einschätzung, dass einzelne Technologien aufgrund von Rohstoffmangel keine Zukunft haben, findet sich jedoch nicht.

Rohstoffkonkurrenz

143. Das Ziel einer Dekarbonisierung aller Sektoren schafft und verschärft weltweite Konkurrenzen um Rohstoffe. Abbildung 4-17 zeigt für acht mobilitätsrelevante Rohstoffe, ausgehend von der realen Produktion in 2013, wie bedeutsam der Bedarf an Rohstoffen für die Elektromobilität im Vergleich zu Bedarfen anderer Zukunftstechnologien im Jahr 2035 sein könnte. Erkennbar sind deutliche Nachfragesteigerungen (vgl. auch Abb. 3-7). Für die Rohstoffe Lithium, Dysprosium, Terbium, Neodym, Praseodym, Kobalt, Platin und Kupfer entsteht dieser Mehrbedarf zu größeren Teilen durch den Verkehrsbereich (MARSCHEIDER-WEIDEMANN et al. 2016 S. 259 ff.).

Da eine Reihe von Rohstoffen in Mengen benötigt wird, die bisher nicht in Produkten verwendet wurden, ist für diese Rohstoffe kurz- und mittelfristig davon auszugehen, dass sie nicht aus Sekundärquellen bereitgestellt werden können. Sie müssen deshalb – bis der Bestandsaufbau abgeschlossen ist und ein Rohstoffrücklauf nach Ende der Nutzung über die Verwertung und Aufbereitung erfolgt – über die Primärgewinnung bezogen werden. Auch Produktionsabfallrecycling trägt zur Reduktion des Primärbedarfs bei.

Umweltwirkungen von Elektromobilität über den Lebensweg

144. Die Betrachtung des gesamten Lebensweges von konventionell und elektrisch betriebenen Fahrzeugen zeigt klare Unterschiede in der Herstellungs- und der Nutzungsphase. Herkömmliche Fahrzeuge sind in der Herstellung weniger aufwendig, benötigen aber in der Nutzungsphase erdölbasierte Energieträger, die gefördert, aufbereitet und transportiert werden müssen. Auch sind die Emissionen von CO_2, NO_x, Feinstaub und Lärm im Vergleich hoch und wirken sich negativ auf Umwelt und Gesundheit aus. Elektrisch betriebene Fahrzeuge verursachen dagegen in der Herstellung aufgrund der benötigten Rohstoffe höhere Umweltbeeinträchtigungen, erreichen aber während der Nutzungsphase – bereits beim derzeitigen Strommix – eine bessere Bilanz (HELMS et al. 2016; Öko-Institut 2017). Die negativen Auswirkungen in der Herstellungsphase werden unter anderem durch den Bedarf an Lithium, Kobalt und Seltenen Erden verursacht, sodass es zu einer Verschiebung des negativen Wirkpotenzials von der Fahrzeugnutzung hin zur Fahrzeugherstellung kommt (FRIESKE et al. 2014).

Die Gewinnung der benötigten Rohstoffe hat in den Erzeugerländern erhebliche Auswirkungen. So zeigen sich für den Wasserbedarf, die Versauerung von Ökosystemen und Feinstaubemissionen in der Gesamtbetrachtung Nachteile für Elektrofahrzeuge, die insbesondere aus dem Rohstoffbedarf für die Batterieproduktion resultieren (HELMS et al. 2016). Daher muss nachdrücklich auf die Verantwortung der Nachfrageseite hingewiesen werden, eine Minimierung der negativen Wirkungen der Rohstoffgewinnung zu initiieren und einzufordern.

Verminderung von Umwelt- und Versorgungsrisiken

145. Alle Formen der Verringerung der Verkehrsleistung (Tz. 103) haben mildernde Wirkung auf Versorgungs- und Umweltrisiken. Ein Weg der Risikominimierung besteht in einer strukturierten Suche nach Substitutionsmöglichkeiten, die eine bessere Umweltbilanz aufweisen. Alternativen für Einzelmaterialien, ganze Techniken oder sogar Nutzenfunktionen können den Nachfragedruck und dadurch verursachte Kritikalitäten absenken (DEGREIF et al. 2017). Im Bereich der Batterien beispielsweise wird intensiv an Post-Lithium-Ionen-Technologien (mit Lithium-Schwefel-/Feststoff-Batterie) geforscht (Öko-Institut et al. 2016; BINE Informationsdienst 2017).

Weitere Strategien sind die Steigerung der Materialeffizienz und der Einsatz von gleichwertigen Sekundärmaterialien. Voraussetzung für deren Gewinnung sind ausreichende Mengen an verwertbaren Abfällen, Aufbereitungstechniken und Absatzmärkte. Neben der Weiterentwicklung der Fahrzeugtechnik am Beginn des Lebenszyklus wird auch an Recyclingtechniken am Ende der Nutzungsdauer geforscht, zum Beispiel für die Leistungselektronik (SCHÜLER et al. 2017), das Recycling von Batterien (TREFFER 2011; BUCHERT et al. 2011b; Verbundprojekt LithoRec II 2016; WEYHE und FRIEDRICH 2016) oder den Elektromotor (BAST et al. 2014). Die

Vorabfassung - wird durch die endgültige Fassung ersetzt.

großtechnische Umsetzung der entwickelten Verfahren wird von den Rücklaufmengen an Altfahrzeugen sowie politischen, rechtlichen und wirtschaftlichen Anreizen abhängen.

146. Die übliche Recyclingroute für Altfahrzeuge führt von der Trockenlegung und gegebenenfalls Demontage einzelner Teile über den Schredder in die Post-Schredder-Behandlung (Behandlung und Verwertung der beim Schreddern erhaltenen Fraktionen). Hierbei werden Ersatzteile, Eisen- und Nichteisenmetalle gewonnen. Die Leistungselektronik (10 bis 20 kg je Fahrzeug) setzt sich vor allem aus Aluminium (58 %), Eisen (9 %), Kupfer (12 %) und Kunststoffen (19 %) zusammen. Die ebenfalls enthaltenen Rohstoffe Gold, Silber, Palladium, Tantal, Niob und Antimon machen zusammen weniger als 1 % aus (BULACH et al. 2017). Durchläuft die Leistungselektronik die oben genannten Prozesse, gelangen Aluminium, Eisen und Kupfer in die weitere Aufbereitung. Die nur in Kleinstmengen vorhandenen Metalle finden sich staubförmig in allen Fraktionen wieder, vor allem aber in der Schredderleichtfraktion, die energetisch verwertet wird (WIDMER et al. 2015). Eine alternative Behandlungsroute setzt auf Demontage der Leistungselektronik und Aufbereitung mit den Verfahren des Elektroaltgeräterecyclings. Gegenüber der Aufbereitung im Autoschredder können auf diesem Wege höhere Rückgewinnungsquoten für Gold, Silber und Palladium erreicht werden. Auch die Rückgewinnungsquoten von Zinn und Kupfer steigen etwas (SCHÜLER et al. 2017). Der Verfahrensweg ist bereits jetzt trotz höherer Kosten wirtschaftlich, setzt aber eine – möglichst einfache – Demontage und den zusätzlichen Transport zur Aufbereitung voraus.

Bei der Verwertung der Batterien werden derzeit in der Regel nur die händisch oder mechanisch abtrennbaren Materialien (z. B. Stahl- oder Aluminiumgehäuse, Kupfer, Leiterplatten) sowie die Kathodenrohstoffe Kobalt und Nickel rezykliert, während das eingesetzte Lithium nicht zurückgewonnen wird (HELMS et al. 2016). Die Rückgewinnung von Lithium ist über pyrometallurgische Prozesslinien technisch bereits heute möglich, jedoch aufgrund des niedrigen Energieverbrauchs der Primärproduktion unter aktuellen Marktbedingungen nicht wirtschaftlich (TREFFER 2011; Verbundprojekt LithoRec II 2016). Grund hierfür ist, dass die derzeitige Lithiumgewinnung aus Lithiumseen wenig Energieeinsatz benötigt und dadurch sehr kostengünstig ist. Im Rahmen ökobilanzieller Betrachtungen, zum Beispiel LithoRec (hydrometallurgische Aufbereitung), wurde festgestellt, dass eine Lithiumrückgewinnung für sich allein betrachtet ökologisch nicht für alle Umweltwirkungskategorien positiv abschneidet. Dies kann sich jedoch ändern, wenn sich der Aufwand für die Primärgewinnung erhöht (z. B. eine energieintensivere Gewinnung aus Lithiumerzen statt aus Lithiumseen) bzw. Fortschritte in der Recyclingtechnologie erreicht werden.

Die (derzeit dominierende) Variante der permanentmagnetisch erregten Synchronmotoren enthält Neodym-Eisen-Bor-Magnete mit Magnetmassen von 1 bis 3 kg je Motor. Der Anteil an Seltenerdelementen liegt bei etwa 32 % (MARSCHEIDER-WEIDEMANN et al. 2016, S. 227). Ein Teil des Neodym lässt sich durch Praseodym ersetzen. Hier spielen Knappheiten und Preise eine bedeutende Rolle bei der Weiterentwicklung von Konkurrenztechnologien (ebd., S. 39). Technisch ist es möglich, die NdFeB-Magnete zerstörungsfrei aus den Motoren zu entfernen. Einer direkten Wiederverwendung stehen jedoch das unterschiedliche Design und die stetige Weiterentwicklung der Magnet- und Motorentechnologien entgegen. Untersuchungen zum werkstofflichen Recycling ergaben eine schlechtere Qualität der gewonnenen Sekundärrohstoffe als durch das rohstoffliche Recycling. Durch eine hydrometallurgische Aufbereitung können reine Seltene Erden als Oxide gewonnen werden, die allerdings eine weitere Aufbereitung (Reduktion zu Seltenerdmetallen) erfordern (BAST et al. 2014). Hier besteht dringender Entwicklungs- und Investitionsbedarf, ehe die Nachfrage nach Rohstoffen und am Ende der Nutzungsdauer der Bedarf an Verwertungskapazitäten deutlich ansteigen.

147. Marktdurchdringung und Technikentwicklung, Konsumentenverhalten und Rohstoffkosten, Exportbeschränkungen und Recyclingquoten sowie eine Anzahl weiterer Variablen lassen sich lediglich abschätzen, um Risiken und Herausforderungen nach Möglichkeit nicht unvorbereitet zu begegnen. Ebenso wie für die Verkehrsmenge insgesamt gilt für die Rohstoffe: Jede Form der Vermeidung hat die größten positiven Wirkungen. Substitution durch weniger umweltbelastende Stoffe, effizientere Nutzung (auch durch eine längere Lebensdauer und bessere Auslastung der Fahrzeuge), Rückholbarkeit und Recycling sind die Second-Best-Möglichkeiten, die aber ausgebaut werden müssen, um Primärrohstoffe durch Sekundärrohstoffe ersetzen zu können. Untersuchungen zur Rückgewinnung kritischer Metalle aus konventionellen Altfahrzeugen empfehlen „eine wirtschaftliche branchengerechte Informationsbereitstellung über Art und Menge der in bestimmten Komponenten der Fahrzeugelektronik enthaltenen kritischen bzw. umweltrelevanten Metalle“ (GROKE et al. 2017). Dies gilt in gleichem Maße für kommende Fahrzeuggenerationen.

Vorabfassung - wird durch die endgültige Fassung ersetzt.

In den kommenden Jahren besteht die Chance, bereits bei der Produktentwicklung die Bedingungen dafür zu schaffen, dass die verwendeten Rohstoffe im Materialkreislauf verbleiben. Dies ist umso bedeutsamer, als dass sich ein Großteil der negativen Auswirkungen von Elektromobilität von der Nutzungsphase in die Produktionsphase (vor allem durch die Primärrohstoffgewinnung) verlagert. Diese Auswirkungen vor allem der Rohstoffgewinnung werden damit ausgelagert und anderen aufgebürdet.

4.2.3 Energieeffizienz

148. Die Umstellung auf treibhausgasneutrale Energieträger ist eine notwendige, aber keine hinreichende Bedingung für das Gelingen der Dekarbonisierung. Eine weitere entscheidende Steuergröße ist die Energieeffizienz. Das folgt allein schon daraus, dass auch in Zukunft Energie nicht unbegrenzt und frei von Umweltbelastungen zur Verfügung stehen wird. Die Energieeffizienz des Verkehrs, hier definiert als spezifischer Energieverbrauch je Pkm bzw. tkm, kann auf verschiedene Arten verbessert werden. Sowohl eine verbesserte Auslastung der Fahrzeuge durch logistische Effizienzmaßnahmen als auch die Verlagerung auf Verkehrsträger mit relativ geringem spezifischen Energieverbrauch tragen zu einer verbesserten Energieeffizienz des Verkehrssystems bei. Nachfolgend liegt der Fokus jedoch auf den Potenzialen für fahrzeugseitige Verbesserungen der Energieeffizienz, das heißt eine technische Reduktion des spezifischen Energieverbrauchs je Fz-km eines gegebenen Verkehrsmittels.

Um die Energieeffizienz eines Fahrzeugs zu verbessern, bestehen grundsätzlich drei technische Ansatzpunkte. Erstens lässt sich die Nutzenergie senken, die zur Erbringung der gewünschten Verkehrs- bzw. Fahrleistung benötigt wird. Hierfür eignet sich insbesondere eine Verringerung der Fahrwiderstände (bspw. durch eine verbesserte Aerodynamik oder eine Gewichtsreduktion des Fahrzeugs), aber auch die Verringerung des Energiebedarfs von Nebenverbrauchern. Zweitens kann der energetische Wirkungsgrad einer gegebenen Antriebstechnologie (z. B. Verbrennungs- oder Elektromotor) durch technische Optimierungen verbessert werden. Drittens kann die Energieeffizienz durch Umstieg auf Antriebstechnologien mit hohem Wirkungsgrad verbessert werden. Der Umstieg auf eine andere Antriebstechnologie geht dabei in der Regel auch mit einem Wechsel des eingesetzten Energieträgers einher. Das Gesamtpotenzial zur Verminderung des spezifischen Energieverbrauchs ergibt sich aus dem Zusammenspiel von Reduktion der benötigten Nutzenergie und Verbesserungen des energetischen Wirkungsgrads zur Bereitstellung dieser Nutzenergie. So ergibt sich der Energiebedarf pro Fz-km aus der benötigten Nutzenergie dividiert durch den Wirkungsgrad der Energieumwandlung.

149. Zu unterscheiden ist dabei zwischen der End- und der Primärenergieeffizienz. Die Endenergieeffizienz setzt die dem Fahrzeug zugeführte Energie ins Verhältnis zur erbrachten Transportleistung. Bei der Primärenergieeffizienz werden überdies die in der Vorkette der Energiebereitstellung entstehenden Verluste miterfasst. Verbesserungen der Endenergieeffizienz durch Verminderung des spezifischen Nutzenergiebedarfs und durch Optimierung einer gegebenen Antriebstechnologie führen zu weitgehend proportionalen Verbesserungen der Primärenergieeffizienz. Bei einem Wechsel der Antriebstechnologie kann sich das Verhältnis von Endenergie- zu Primärenergieverbrauch hingegen maßgeblich ändern. Nachfolgend liegt der Fokus auf den ersten beiden Möglichkeiten zur Verbesserung der Energieeffizienz, das heißt auf der Verminderung von Nutzenergiebedarf und der Erhöhung des Wirkungsgrades, während die spezifischen Vor- und Nachteile verschiedener Antriebstechnologien bereits in Abschnitt 4.2.2 betrachtet wurden.

Grundsätzlich bestehen bei allen Verkehrsmitteln noch Potenziale zur Verbesserung der Energieeffizienz. Bei den landgebundenen Verkehrsträgern gilt dies insbesondere für Straßenfahrzeuge. Der Schienenverkehr, soweit er elektrifiziert ist, weist bereits heute einen vergleichsweise hohen energetischen Wirkungsgrad auf. Die durchschnittliche Energieeffizienz des Schienenverkehrs ließe sich mithin vor allem durch zusätzliche Streckenelektrifizierungen weiter verbessern, die allerdings nur bei Strecken mit ausreichender Frequentierung in der Gesamtbilanz einen (nennenswerten) Klimavorteil bieten.

Pkw

150. Grundsätzlich lässt sich im Bereich Pkw die Energieeffizienz von Fahrzeugen mit allen Antriebstechnologien weiter verbessern. Wie aufgezeigt, sind dabei Potenziale zur Reduktion der benötigten Nutzenergie und zur Verbesserung des Wirkungsgrades bei der Energieumwandlung zu unterscheiden. Eine Reduktion der benötigten Nutzenergie – beispielsweise durch Leichtbau, Reifen mit geringerem Rollwiderstand oder eine Reduktion des Luftwiderstandes – kommt dabei grundsätzlich allen Fahrzeugen unabhängig von der verwendeten Antriebstechnologie zugute. Die Erschließung solcher Potenzia-

Vorabfassung - wird durch die endgültige Fassung ersetzt.

le lässt sich insofern als No-Regret-Strategie einordnen. Auch bei Unsicherheit über die zukünftige Marktdiffusion verschiedener Antriebstechnologien würde hierdurch ein Beitrag für die Dekarbonisierung des Verkehrs geleistet. Gemäß verschiedener Studien beläuft sich das Potenzial zur Reduktion der benötigten Nutzenergie auf etwa 15 bis 30 %, wobei große Teile davon bereits relativ kurzfristig (d. h. bis zum Jahr 2025) und kostendeckend zu erschließen sind (ERNST et al. 2014, S. 133; MESZLER et al. 2016; BERGK et al. 2016; SMOKERS et al. 2012; Ricardo Inc. und Systems Research and Applications Corporation 2011; KÜHLWEIN 2016a; 2016b; PANNONE 2015; NRC 2013, S. 17 ff. und Tab. S. 23). Das genaue Potenzial für eine Reduktion der benötigten Nutzenergie hängt auch von den Anforderungen ab, die an die Fahrzeuge gestellt werden: Hält der Trend zu großen und leistungsstarken Fahrzeugen (z. B. SUV) an, vermindert dies das Potenzial gegenüber einer Flottenentwicklung hin zu kompakteren Fahrzeugen.

151. Benzin- und Gas-Verbrennungsmotoren weisen die größten Potenziale zur Verbesserung des Wirkungsgrades des ihres Antriebsstranges auf. Das verbleibende Potenzial von Dieselmotoren fällt dagegen geringer aus. Einen wichtigen Ansatzpunkt, um die Energieeffizienz von verbrennungsmotorischen Pkw zu steigern, stellt die Hybridisierung dar. Durch diese wird insbesondere im Stadtverkehr die Effizienz verbessert und die partielle Rückgewinnung von Bremsenergie ermöglicht (MESZLER et al. 2016). Elektromotoren, die batterieelektrische und Brennstoffzellenfahrzeuge antreiben, weisen bereits heute einen sehr hohen Wirkungsgrad auf, sodass das weitere Effizienzpotenzial vergleichsweise gering ist. Weitere Potenziale – im einstelligen Prozentpunktbereich – bestehen bei der Umwandlung von Wasserstoff zu Strom in der Brennstoffzelle sowie bei der Minderung von Verlusten beim Laden der Batterien. Weitere Fortschritte bei der Energiedichte von Batterien können – durch eine Reduktion des Fahrzeuggewichts – ebenfalls dazu beitragen, die Energieeffizienz von batterieelektrischen Fahrzeugen zu verbessern. Gemäß der obigen Abgrenzung entspricht dieser Effekt jedoch einer Verminderung der benötigten Nutzenergie und nicht einer Verbesserung des Wirkungsgrades des Antriebs.

Insgesamt wird das – wirtschaftliche – Potenzial für eine Minderung des spezifischen Endenergiebedarfs von Pkw mit Verbrennungsmotor auf nahezu 50 %, für batterieelektrische und Brennstoffzellenfahrzeuge auf circa 35 % geschätzt (MESZLER et al. 2016; SCHMIED et al. 2015; KASTEN et al. 2016; HÜLSMANN et al. 2014). Die Maximalpotenziale beziehen sich zwar auf das Jahr 2050, sind bei ambitionierter politischer Unterstützung zu großen Teilen allerdings bereits vor 2030 realisierbar. Eine Studie des International Council on Clean Transportation kommt zu dem Ergebnis, dass bereits bis zum Jahr 2025 für Pkw mit Verbrennungsmotor ein Wert von 70 g CO_2/km – gemessen im NEFZ – zu vergleichsweise geringen Kosten erreichbar ist. Dies entspräche einer Minderung der spezifischen Emissionen von über 40 % gegenüber dem gegenwärtigen Durchschnitt (MESZLER et al. 2016).

Leichtbau als Mittel zur Verminderung des Energieverbrauchs

152. Seit vielen Jahren wird versucht, das Gewicht von Fahrzeugen durch Leichtbau zu vermindern. Dabei wurden Leichtbauweisen nicht nur aus Gründen des Klimaschutzes entwickelt, sondern auch aufgrund steigender Kraftstoffpreise. Die Gewichtsreduzierungen, die in der Vergangenheit durch Leichtbau erzielt werden konnten, wurden allerdings häufig durch eine Gewichtszunahme aus anderen Gründen überkompensiert. So wurde die Sicherheitstechnik verbessert, zum Beispiel durch Antiblockiersysteme oder Seitenaufprallschutz, Umwelttechniken wie Katalysatoren eingeführt und der Komfort technisch verbessert (z. B. durch Motoren zur elektronischen Sitzverstellung). Mit Blick auf die Elektromobilität hat der Leichtbau vor allem Bedeutung für die Erhöhung der Reichweite der Fahrzeuge (MARSCHEIDER-WEIDEMANN et al. 2016).

Als generelle Strategie, um eine Leichtbaulösung zu konstruieren, kommen die Verminderung des Werkstoffeinsatzes, der Einsatz leichterer Werkstoffe und die Veränderung der Produktstruktur infrage (VOGT et al. 2015). Die im Automobilbau hauptsächlich bisher verfolgten Ansätze sind (ebd.)

- der Einsatz von Leichtmetallen, insbesondere der Ersatz von Stahl durch Aluminium,
- der Einsatz von Tailored Blanks unter Verwendung hoch- und höchstfester Stähle und
- die Nutzung von kohlenstofffaserverstärkten Kunststoffen (CFK).

Weitere werkstoffliche Optionen zur Gewichtsreduzierung werden erforscht, so zum Beispiel der Einsatz von Metallschäumen (ebd.).

Bereits vor einigen Jahren bestanden Rohkarosserien aus Stahl im Durchschnitt zu 40 % aus Tailored Blanks

Vorabfassung - wird durch die endgültige Fassung ersetzt.

(MARSCHEIDER-WEIDEMANN et al. 2016). Daneben werden serienmäßig bereits hybride Werkstoffe, das heißt Verbunde aus Stahl- und Aluminiumwerkstoffen sowie CFK, eingesetzt (FRIEDRICH und KRISHNAMOORTHY 2017).

Tailored Blanks sind Blechplatinen, die aus verschiedenen Werkstoffgüten und Blechdicken zusammengesetzt sind. Dafür werden Stähle unterschiedlicher Werkstoffgüte durch Laserschweißen zusammengefügt, sodass die Werkstoffgüten und Blechdicken der Belastung der einzelnen Partien der Karosserie angepasst werden können. Im Vergleich zu herkömmlichen Stahlteilen lassen sich so bis zu 25 % Gewicht einsparen (LIEBERWIRTH und KRAMPITZ 2015). Um die spezifischen Eigenschaften der für Tailored Blanks eingesetzten hoch- und höchstfesten Stähle zu erzielen, werden unterschiedliche Legierungselemente eingesetzt. Hierzu zählen beispielsweise Mangan, Silizium und Aluminium in Dualphasenstählen und Nickel, Kobalt und Mangan in austenitischen Stählen (MARSCHEIDER-WEIDEMANN et al. 2016). Weiterhin werden Niob, Vanadium und Bor eingesetzt (PILARSKY 2014). Eine Weiterentwicklung stellen hybride Tailored Blanks dar, die hoch- und höchstfeste Stähle mit Aluminium kombinieren (MARSCHEIDER-WEIDEMANN et al. 2016).

Bezüglich faserverstärkter Kunststoffe ist vor allem die Verwendung von CFK relevant. Mit CFK lassen sich sowohl gegenüber Stahl als auch Aluminium die größten Gewichtsreduzierungen und damit Energieeinsparungen im Betrieb der Fahrzeuge erzielen. Gleichzeitig ist die Herstellung von CFK mit einem sehr hohen spezifischen Energieaufwand verbunden und basiert auf einem Verbund aus Duroplasten (z. B. Epoxidharz) oder Thermoplaste (z. B. Polyamid) mit Kohlenstofffasern aus erdölbasiertem Polyacrylnitril.

Bezüglich der möglichen Gewichtsreduktion werden für CFK Werte von 52 bis 79 % und für Aluminium von circa 40 % angegeben (e-mobil BW et al. 2012).

Leichtbauwerkstoffe aus Metallen haben generell eine hohe Recyclingfähigkeit. Wenn hybride Werkstoffe genutzt werden, ist die manuelle oder mechanische Trennbarkeit der unterschiedlichen Metalle eine Voraussetzung für ein hochwertiges Recycling (MARSCHEIDER-WEIDEMANN et al. 2016). Für CFK-Werkstoffe hat sich bisher hingegen kein Verfahren für eine stofflich hochwertige Verwertung durchgesetzt. Sie werden derzeit vorranging thermisch verwertet. Mittels Pyrolyse lassen sich prinzipiell auch Fasern zurückgewinnen. Diese sind jedoch aufgrund ihrer verkürzten Länge nicht wieder im Automobilbau oder weiteren hochwertigen Anwendungen (z. B. Rotorblätter) einsetzbar (WOIDASKY 2013). Weitere Verfahren, wie zum Beispiel die Herstellung von Garnen aus Rezyklat-Fasern, befinden sich in der Erforschung (ebd.). GFK-Werkstoffe werden vor allem in der Zementindustrie verwertet. So werden der Energiegehalt und die Eigenschaften der mineralischen Fasern für die Herstellung von Zementklinker genutzt (WOIDASKY 2013; QUICKER und STOCKSCHLÄDER 2017).

Leichtbauwerkstoffe werden in der Regel auf Umweltentlastungspotenziale während der Nutzungsphase hin optimiert (WOIDASKY 2013) und erzielen hier Energieeinsparungen gegenüber herkömmlichen Karosseriematerialien (e-mobil BW et al. 2012). Da sie jedoch in der Herstellung energieintensiv sind und ein Vielfaches der Herstellungsenergie von Stahl- oder Aluminiumbauteilen benötigen (ebd.), ist ihre hochwertige Rezyklierbarkeit zur Erzielung weiterer Umweltentlastungen relevant. Auch die Herstellung von Primäraluminium ist mit einem höheren Energiebedarf verbunden als die Primärherstellung von Stahl. Gleichzeitig müssen Aluminiumbauteile in der Regel aber größer dimensioniert werden als Stahlteile, da sie eine geringere Festigkeit aufweisen (MARSCHEIDER-WEIDEMANN et al. 2016; e-mobil BW et al. 2012). Trotzdem sind sie leichter als die Stahlbauteile, die sie ersetzen. Sekundäraluminium kann aufgrund der Verunreinigungen in der Regel allerdings nicht eingesetzt werden (MARSCHEIDER-WEIDEMANN et al. 2016), sodass die Herstellung von energieintensivem Primäraluminium notwendig ist. Insbesondere bei Verbunden von Materialien, die sich nicht gemeinsam recyceln lassen, sind eine gute Kennzeichnung und Information für die Entsorgung sowie eine gute Trennbarkeit notwendig.

Eine ökobilanzielle Betrachtung von Leichtbauteilen aus Stahl, Aluminium und CFK kam zu dem Ergebnis, dass keines der Materialien aus Umweltsicht insgesamt deutliche Vor- oder Nachteile gegenüber den anderen Materialien hat (e-mobil BW et al. 2012). So hat zum Beispiel CFK den höchsten Energieaufwand in der Produktion, aber auch das größte Einsparpotenzial in der Nutzungsphase. Folglich führt eine Erhöhung der Fahrleistung zu einer besseren Umweltbilanz. In Bezug auf die Verwertung erhalten alle drei Materialien Gutschriften, wobei bei Stahl und Aluminium von einer stofflichen und bei CFK von einer thermischen Verwertung ausgegangen wird. Anzumerken ist, dass sich die Gutschrift bei CFK mit Änderung des Strommixes hin zu

Vorabfassung - wird durch die endgültige Fassung ersetzt.

einem immer größeren Anteil erneuerbarer Energien verringern wird bzw. sogar zu einer anzurechnenden Umweltbelastung führt. Im Sinne einer möglichst vollständigen Vermeidung von Treibhausgasemissionen sollte eine thermische Verwertung von aus fossilen Rohstoffen hergestellten CFK aufgrund der damit verbundenen CO_2-Emissionen zukünftig nicht mehr durchgeführt werden.

Lkw

153. Obschon die Kraftstoffeffizienz bereits heute ein Kriterium bei der Anschaffung schwerer Nutzfahrzeuge ist, zeigen verschiedene Studien das nach wie vor große Potenzial für weitere, größtenteils kosteneffiziente Verbesserungen beim spezifischen Kraftstoffverbrauch auf (HILL et al. 2011; JACKSON 2011; LAW et al. 2011; DELGADO et al. 2017; 2016; SCHMIED et al. 2015; Ricardo Energy & Environment 2017; SCHROTEN et al. 2012; DÜNNEBEIL et al. 2015; HÜLSMANN et al. 2014). Bei Dieselfahrzeugen, die im Güterverkehr derzeit einen Anteil von weit über 90 % haben (RODRÍGUEZ et al. 2017), werden – bei erheblicher Bandbreite der Studien – im Mittel Potenziale zur Senkung des spezifischen Verbrauchs von etwa 30 % identifiziert. Die Potenziale liegen sowohl in einer weiteren motorischen Optimierung als auch bei Gewichtsreduktionen und der Verringerung des Luft- und Rollwiderstandes. Durch Hybridisierung ließen sich zusätzliche Potenziale beim Verbrennungsmotor-Lkw erschließen. Allerdings sind die Effizienzgewinne durch Hybridisierung bei schweren Lkw im Fernverkehr mit hohem Autobahnfahranteil eher gering. Trotz der vorhandenen Effizienzpotenziale hat sich der spezifische Kraftstoffverbrauch schwerer Nutzfahrzeuge aufgrund verschiedener Markthemmnisse in den letzten 15 Jahren kaum verändert (MUNCRIEF und SHARPE 2015; DÜNNEBEIL et al. 2015; AARNINK et al. 2012).

Um die Potenziale zur Energieeffizienzverbesserung möglichst vollständig auszuschöpfen, ist es wichtig, nicht nur die Motoreneffizienz, sondern auch die Aufbauten und Anhänger – das heißt den gesamten Fahrzeugzug – zu optimieren (SRU 2012, Tz. 237). In diesen Bereichen erzielte Effizienzsteigerungen sind auch im Hinblick auf eine direkte und indirekte Elektrifizierung des Straßengüterverkehrs von nachhaltigem Nutzen, da sie den induzierten Anstieg der Stromnachfrage bremsen.

See- und Luftverkehr

154. Im See- und Luftverkehr werden nach derzeitigem Stand auch weiterhin vor allem Verbrennungsmotoren zum Einsatz kommen. Ein Umstieg auf alternative Antriebsformen mit höherer Endenergieeffizienz ist derzeit nicht absehbar. Hierzu wären substanzielle technologische Fortschritte, insbesondere bei der Energiedichte, notwendig. Eine direkte Elektrifizierung ist bei Schiffen bislang lediglich für Fährverkehre darstellbar, da für die im Seeverkehr zurückgelegten Strecken die Batteriekapazitäten nicht ausreichend sind. Allerdings kann die Versorgung mit Bordstrom, der bislang aus Schiffsdiesel erzeugt wird und zu erheblichen Schadstoffemissionen führt, durch Batterien bzw. in Häfen durch eine direkte Stromversorgung erfolgen. Dennoch bestehen auch im See- und Luftverkehr erhebliche Potenziale zur Verbesserung der Energieeffizienz der eingesetzten verbrennungsmotorischen Fahrzeuge. Im Luftverkehr

Tabelle 4-7

Verkehrsaufkommen in Deutschland 2010 nach Verkehrsmitteln und Entfernungsklassen (in Mio. Personenfahrten/Jahr)

Entfernungsklasse[1]	Bahn	MIV	Luft	ÖSPV[2]	Fahrrad	Fußgänger	Summe
0– 10	1.063	40.976	0	7.577	8.912	24.011	82.538
11– 50	1.010	11.405	0	1.609	563	0	14.587
51– 150	245	2.994	0	36	4	0	3.280
151– 300	59	685	1	27	0	0	772
301– 600	49	327	22	16	0	0	413
601–1.000	8	65	24	9	0	0	105
> 1.000	1	24	85	3	0	0	113
Summe	**2.434**	**56.475**	**132**	**9.277**	**9.479**	**24.011**	**101.808**

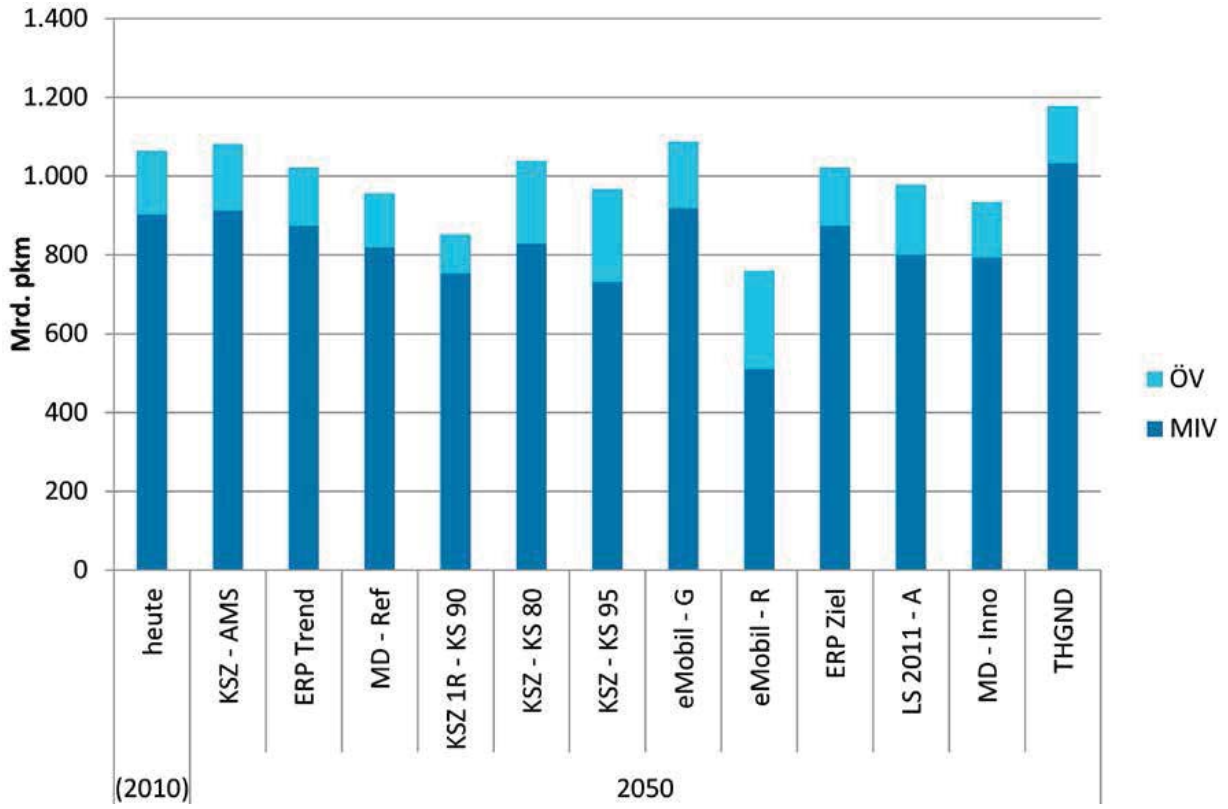
[1] Hier: Gesamtentfernung, d. h. inkl. Streckenanteile im Ausland, ohne Transitverkehr
[2] Öffentlicher Straßenpersonenverkehr

Quelle: BVU Beratergruppe Verkehr + Umwelt et al. 2014, S. 224

Vorabfassung - wird durch die endgültige Fassung ersetzt.

Abbildung 4-18

Personenverkehrsnachfrage 2050



Quelle: BLANCK und ZIMMER 2016, S. 16

wird das Potenzial zur Reduktion des spezifischen Endenergieverbrauchs auf circa 50 % bis 2050 geschätzt, im Seeverkehr liegt der Wert bei etwa 40 % (SCHMIED et al. 2015, S. 25; KASTEN et al. 2016).

Effizienz ist eine notwendige, aber nicht hinreichende Bedingung für erfolgreiche Dekarbonisierung

155. Selbst im Falle einer vollständigen Ausschöpfung aller vorhandenen Potenziale könnten fahrzeugseitige Verbesserungen der Energieeffizienz (ohne Wechsel der Antriebstechnologie) allein weniger als eine Halbierung des Energieverbrauchs und der Treibhausgasemissionen des Verkehrs erreichen. Berücksichtigt man das prognostizierte weitere Verkehrswachstum, insbesondere des Güterverkehrs, fällt die erzielbare Emissionsminderung noch weit geringer aus. Dies unterstreicht die Notwendigkeit, den Energieverbrauch des Verkehrssektors auch durch eine ambitionierte Vermeidungs- und Verlagerungsstrategie zu adressieren, zumal Effizienzstrategien immer anfällig für Rebound-Effekte sind. Nichtsdestotrotz sind Effizienzverbesserungen ein zentraler Hebel für die Dekarbonisierung des Verkehrs. Erst eine Verbesserung der Energieeffizienz reduziert die Menge benötigter treibhausgasneutraler Energieträger in dem Maße, dass die vollständige Dekarbonisierung des Verkehrs umsetzbar erscheint.

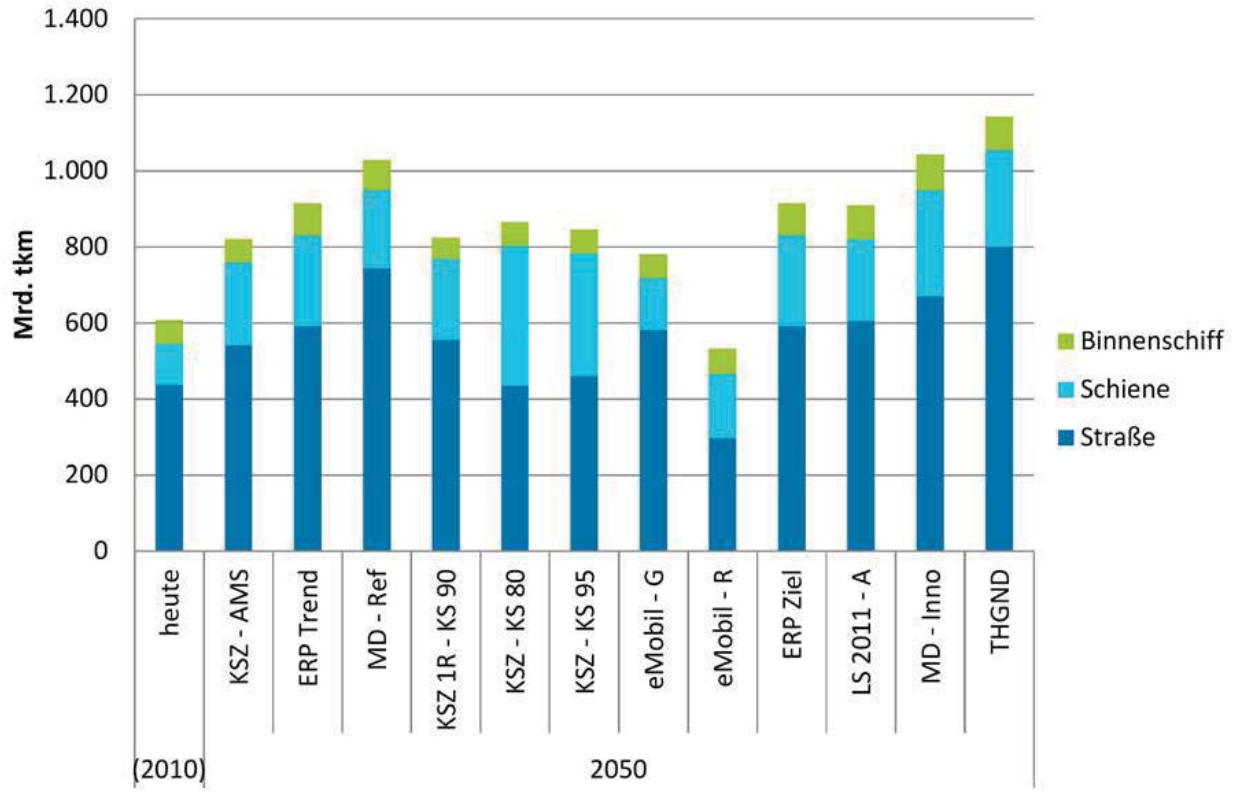
4.2.4 Verlagerung und Vermeidung von Verkehr

156. Um Treibhausgasemissionen im Verkehr zu mindern, muss dieser auch auf energieeffizientere und klimafreundlichere Verkehrsmittel verlagert bzw. ganz vermieden werden. 80 % der gesamten Verkehrsleistung wird auf langen Distanzen außerhalb von Kernstädten erbracht (Öko-Institut et al. 2016, S. 25). Für die Stadtverkehre bestehen vielfältige Möglichkeiten der Verlagerung auf den Fuß- und Radverkehr, die hier nicht näher betrachtet werden. Besonders relevant ist in der kurz- und mittelfristigen Perspektive die Verlagerung von Verkehren auf langen Distanzen im Personen- und Güterfernverkehr auf die Schiene. Die Verkehrsprognose 2030 stellt die Verkehrsmittelanteile nach Entfernungsklassen

Vorabfassung - wird durch die endgültige Fassung ersetzt.

Abbildung 4-19

Güterverkehrsnachfrage 2050



Quelle: BLANCK und ZIMMER 2016, S. 19

dar (Tab. 4-7). Wenn man die Entfernungen zwischen 51 und 150 km sowie zwischen 151 und 300 km betrachtet, wird deutlich, dass der Anteil des MIV auf diesen Strecken den des Schienenverkehrs um den Faktor 10 übersteigt. Selbst bei Entfernungen zwischen 301 und 600 km ist der Anteil immer noch achtfach so groß. Dies macht deutlich, dass potenziell erhebliche Verlagerungspotenziale von der Straße auf die Bahn bestehen, dass dies aber auch erhebliche Auswirkungen auf die Infrastruktur haben würde.

157. Die Verlagerung und Vermeidung von Verkehren ist auch deshalb von großer Bedeutung, weil damit die über den Klimaschutz hinausgehenden Umwelt- und Gesundheitsfolgen des Verkehrs adressiert werden (Tz. 75. ff.). Der hohe Nutzen einer Änderung des Mobilitätsverhaltens in Bezug auf die Verringerung von Schadstoffen, Lärm und Verkehrsunfällen und für die Verbesserung der Lebensqualität kann einen Anreiz für die Verkehrswende darstellen (Agora Verkehrswende 2017, S. 89 f.). Dies gilt vor allem für den Stadtverkehr, aber auch für die Fernverkehre. Einen Überblick über die in verschiedenen Studien angenommene Entwicklung der Verkehrsleistung bietet Tabelle 4-8. Die Annahmen verschiedener Studien zur Entwicklung der Personenverkehrsnachfrage sind in Abbildung 4-18 dargestellt.

158. Die Einschätzungen, wie groß der Anteil des Personenfernverkehrs ist, der auf die Schiene verlagert werden kann, sind überwiegend relativ zurückhaltend (z. B. NORDENHOLZ et al. 2016). Betrachtet werden vor allem Maßnahmen, mit denen der Bahnverkehr beschleunigt werden kann (Deutschland-Takt) bzw. günstiger wird. Außerdem wird vorgeschlagen, dass die Attraktivität konkurrierender Verkehrsmittel gedämpft werden sollte. Nur wenige Studien gehen von einer deutlichen Reduktion der Personenverkehrsleistung aus (Klimaschutzszenarien KS 90 und KS 95: Reduktion des MIV um circa 17 % bzw. fast 20 % aufgrund geänderten Mobilitätsverhaltens; Szenario Regional eMobil: Reduktion von 43 % ggü. 2010 (BLANCK und ZIMMER 2016, S. 15) sowie Szenario Verkehrswende für Deutschland: Reduktion um rund 40 % im Jahr 2035 ggü. 2015 (RUDOLPH et al. 2017, S. 66)).

Vorabfassung - wird durch die endgültige Fassung ersetzt.

Vorabfassung - wird durch die endgültige Fassung ersetzt.

Tabelle 4-8

Entwicklung der Verkehre

		Verkehrsleistung PV[1] 2010–2050	Verkehrsleistung GV[2] 2010–2050	Energieverbrauch 2050	Anteil Biokraftstoffe 2050	Anteil Strom 2050	Anteil EE-Kraftstoffe 2050	Mio.t CO_2 2050
Verbändekonzept		– 15 %	– 4 %	806		30 %		9
Energiekonzept	Referenz	– 7 %	61 %	1.940	16 %	8 %	1 %	85
	Ziel I/IV	– 10 %	63 %	1.512	51 %	15 %	1 %	18
Modell Deutschland	Referenz	– 8 %	61 %	1.890	17 %	7 %	1 %	103
	Innovation	– 10 %	63 %	1.560	59 %	12 %	1 %	30
	Modell D	– 10 %	63 %	1.560	78 %	12 %	1 %	8
THGNV3 2050	Basis	16 %	103 %	2.412	8 %	3 %	0 %	125
	Ziel	11 %	87 %	1.623	0 %	20 %	80 %	0
Leitstudie	Sz. A	– 7 %	46 %	1.521	20 %	14 %	16 %	56
	Sz. B	– 7 %	46 %	1.564	19 %	14 %	17 %	57
	Sz. C	– 7 %	46 %	1.379	22 %	25 %	0 %	54

[1] Personenverkehr, [2] Güterverkehr, [3] Treibhausgasneutraler Verkehr

Quelle: ERHARD et al. 2014, S. 56

159. Im Güterverkehr wird praktisch durchweg eine deutliche und kontinuierliche Zunahme der Verkehrsleistung auf der Straße angenommen (s. Abb. 4-19). Allerdings weichen die Schätzungen stark voneinander ab, was teilweise darauf zurückzuführen ist, dass lange Zeit keine offizielle Verkehrsprognose vorlag. Diese Zuwächse des Straßengüterverkehrs entstehen trotz der geplanten Maßnahmen zur Stärkung und dem resultierenden starken Wachstum des Schienengüterverkehrs (im Einzelnen: BLANCK und ZIMMER 2016). Studien zeigen aber auch, dass der Modal-Split-Anteil des Schienengüterverkehrs deutlich erhöht werden kann, was jedoch mit sehr hohen Kosten verbunden ist. Durch eine verbesserte Infrastruktur für den Schienengüterverkehr und eine zusätzliche Technologieverbesserung durch staatliche Beihilfen ließen sich (im Verbund mit Maßnahmen im Straßengüterverkehr) der Endenergiebedarf und die CO_2-Emissionen im Güterverkehr gegenüber 2010 immerhin stabilisieren. Für eine spürbare Entlastung wäre aber eine neue Multimodalität des Schienengüterverkehrs erforderlich (LOBIG et al. 2016).

Als Ursache für das Wachstum des Güterverkehrs wird vor allem auf das prognostizierte Wachstum des BIP verwiesen. Allerdings wächst die Güterverkehrsleistung teilweise deutlich stärker als das BIP (DÜNNEBEIL et al. 2013, S. 27, Abb. 5). Für Deutschland wird dies auch mit seiner Rolle als Transitland und wichtigem Handelspartner in Europa begründet. Mit dem vorhergesagten weiteren Wachstum des Güterverkehrs hat sich der SRU in seinem Umweltgutachten 2012 kritisch auseinandergesetzt (SRU 2012, Tz. 244 ff.). Dabei hat er darauf hingewiesen, dass die Wachstumsraten hinterfragt werden müssen, und dass eine schlichte Fortschreibung der Trends sich schon aufgrund infrastruktureller Knappheiten als unzutreffend herausstellen könne. Kritisch aufgeworfen wurde die Frage, ob zum Beispiel die Tertiarisierung der Ökonomie, das heißt die Umwandlung zu einer Dienstleistungsgesellschaft, zu einer Abschwächung des Wachstumstrends beitragen könnte. Darüber hinaus ist anzumerken, dass die Verkehrsprognose 2030 politische Maßnahmen annimmt, von denen nicht sicher ist, dass sie realisiert werden. Fraglich ist auch, ob die Annahmen zum Wirtschaftswachstum generell und zu dem mit dem Wirtschaftswachstum einhergehenden Anstieg der Transportnachfrage plausibel sind. Da die neueren Szenarien überwiegend auf einer Fortschreibung der Verkehrsverflechtungsprognose 2030 basieren, stellt sich deshalb die Frage, ob eine Modellierung, die die dort getroffenen Annahmen hinterfragt, zu anderen Ergebnissen gelangen würde. Dies gilt allerdings nicht für die in Tabelle 4-8 aufgeführten Szenarien, die nicht auf der

Verkehrsprognose 2030 beruhen. Die Tabelle gibt einen Überblick über Ergebnisse von neueren Szenarienrechnungen.

Dass die Verkehrsvermeidung in den betrachteten Szenarien keine nennenswerte Rolle spielt, kann auch an methodischen Schwierigkeiten liegen. Keines der Szenarien hat die Wechselwirkungen zwischen Siedlungsstrukturen, Infrastruktur und Verkehrswachstum detailliert betrachtet und modelliert. Verkehrsrelevante Veränderungen von Raumstrukturen werden nicht unterstellt (BLANCK und ZIMMER 2016). Bislang nicht untersucht wird auch die Frage, ob die Energiewende zu Änderungen der Produktionsstrukturen, wie einer reduzierten Bautätigkeit oder weniger Kohletransporten, führen kann, die zur Folge haben, dass sich die Transportbedarfe verändern. Die Kopplung der Transportnachfrage an Strukturänderungen in den stationären Sektoren wird bisher in Szenarienstudien nicht berücksichtigt. Lediglich die Szenarien Regional eMobil (im Rahmen des Projektes „eMobil 2050") und Klimaschutzszenario 95 (im Rahmen des Vorhabens „Klimaschutzszenario 2050") unterstellen in einem vereinfachten Ansatz entsprechende Annahmen (Stadt der kurzen Wege, regionale Wirtschaftskreisläufe), was sich dort in einer vergleichsweise geringeren Verkehrsnachfrage widerspiegelt. Doch stellt die hohe Komplexität der Zusammenhänge zwischen Siedlungsstrukturen und Verkehren für wissenschaftlich fundierte Aussagen eine sehr hohe Hürde dar, weshalb diese in den meisten Studien nicht betrachtet oder stark vereinfacht werden. Trotzdem können auch Strategien, die auf die Veränderungen von Siedlungsstrukturen oder regionalere Wirtschaftskreisläufe abzielen, aus Klimaschutzsicht sinnvoll sein (BLANCK und ZIMMER 2016, S. 34 f.).

4.2.5 Mögliche Ko-Benefits von Veränderungen im Verkehrssektor

160. Die verschiedenen Wege zur Umstrukturierung des Verkehrssektors sollten nicht nur auf ihre Effektivität zur Minderung von Treibhausgasemissionen hin untersucht werden, sondern auch bezüglich ihrer Wirkungen auf andere Umweltaspekte. Denn Ziel sollte auch eine Entlastung hinsichtlich anderer negativer Auswirkungen des Verkehrs sein. Im Folgenden werden die verschiedenen vorgestellten Maßnahmen auf ihre sonstigen Umweltwirkungen hin qualitativ bewertet.

Tabelle 4-9 verdeutlicht, dass Veränderungen des Verkehrssektors zahlreiche Synergieeffekte im Hinblick auf andere Umweltauswirkungen haben können, dies jedoch nicht in jedem Fall für jede Umweltbelastung zutrifft.

161. Während bei direkt-elektrischen und Wasserstofffahrzeugen in der Nutzungsphase (Tank-to-Wheel) keine direkten NO_x-Emissionen auftreten, entstehen bei der Verbrennung von synthetischen Kraftstoffen (PtX) weiterhin NO_x-Emissionen (BÜNGER et al. 2014). Wird die gesamte Kraftstoffkette einbezogen (Well-to-Wheel), ergeben sich – bei Nutzung erneuerbaren Stroms in der Vorkette – auch für PtX Vorteile bezüglich des aus NO_x- und SO_2-Emissionen resultierenden Versauerungspoten-

Tabelle 4-9

Ko-Benefits der Verkehrswende für andere lokale Umweltaspekte in der Nutzungsphase

	Technologieumstieg			Energieeffizienz	Verlagerung	Vermeidung
	Direkt-elektrisch	Wasserstoff	PtX			
NO_x	xx	xx	(x)	(x)/–	x	xx
PM_{10}	x	x	(x)	(x)/–	x	xx
Lärm	(x)	(x)	(x)	–	x	xx
Flächenverbrauch	–	–	–	–	x	xx

xx Es gibt einen deutlichen Ko-Benefit der Technologie/Maßnahme für die entsprechende Emission/Umweltbelastung
x Es gibt einen mittleren Ko-Benefit der Technologie/Maßnahme für die entsprechende Emission/Umweltbelastung
(x) Es gibt einen geringen Ko-Benefit der Technologie/Maßnahme für die entsprechende Emission/Umweltbelastung
– Es gibt keinen Ko-Benefit der Technologie/Maßnahme für die entsprechende Emission/Umweltbelastung

SRU 2017

Vorabfassung - wird durch die endgültige Fassung ersetzt.

zials von Ökosystemen gegenüber fossilen Kraftstoffen auf der Basis von Rohöl (ebd.). Ausgehend davon, dass für Fahrzeuge mit Verbrennungsmotoren der Grenzwert für NO_x von der Euro-5-Norm zur Euro-6-Norm um 60 % gesenkt wurde, würde sich potenziell auch hier eine Entlastung gegenüber dem heutigen Status quo ergeben (MICHAELIS et al. 2015). Jedoch zeigen Berechnungen, dass auch bei Diesel-Pkw der Euro-6-Norm deutlich mehr NO_x ausgestoßen werden als vermutet („Stickoxid-Belastung durch Diesel-PKW noch höher als gedacht", Pressemitteilung Nr. 16 des UBA vom 25.04.2017). Energieeffizienzmaßnahmen können sowohl Erhöhungen als auch Reduzierungen der NO_x-Emissionen zur Folge haben. Fußen Energieeffizienzmaßnahmen zum Beispiel auf der Reduzierung des Fahrzeuggewichts und führen somit zu einem geringeren Verbrauch, sind damit auch geringere Emissionen der sonstigen Schadstoffe verbunden. Wird für eine höhere Energieeffizienz aber die Verbrennungstemperatur von Motoren erhöht, kann dies zu höheren NO_x-Emissionen führen. Um die Grenzwerte einhalten zu können, müsste in diesem Fall die Abgasminderungseinrichtung entsprechend angepasst werden. Insgesamt zeigen batterieelektrische und wasserstoffbetriebene Pkw gegenüber zukünftigen Flotten mit Verbrennungsmotor bezüglich der NO_x-Emissionen deutliche Vorteile.

Die Feinstaubemissionen des Verkehrs setzen sich aus zwei Quellen zusammen: Zum einen handelt es sich um Abgaspartikel aus der Verbrennung des Kraftstoffes und zum anderen um den Reifen- und Bremsabrieb. Hinsichtlich der Feinstaubemissionen im Abgas ist davon auszugehen, dass direkt-elektrische und wasserstoffbetriebene Fahrzeuge emissionsfrei sind. Für die Nutzung von PtX liegen wenige Erkenntnisse vor – je nach Verbrennungstemperaturen, Entstehung von PM_{10}-Vorläufersubstanzen und eingesetzter Partikelminderungseinrichtung ist hier aber weiterhin von Emissionen auszugehen. Feinstaubemissionen aus Reifen- und Bremsabrieb sowie Aufwirbelungen werden bei gleichbleibender Verkehrsleistung bestehen bleiben – unabhängig von der Art des Antriebs (MICHAELIS et al. 2015). Messungen in Berlin zeigten, dass die PM_{10}-Emissionen aus Abrieb und Aufwirbelungen 75 % der Kfz-Feinstaubemissionen betragen (Bezugsjahr 2009) (Senatsverwaltung für Stadtentwicklung und Umwelt Berlin 2015). Die dargestellte Prognose für das Jahr 2020 zeigt, dass bei den Abgaspartikeln von einer weiteren starken Reduzierung der Feinstaubemissionen ausgegangen wird, während die aus Abrieb und Aufwirbelungen stammenden Feinstaubemissionen voraussichtlich in der Größenordnung der Vorjahre bleiben werden (ebd.). Dies liegt darin begründet, dass Abgasstaubemissionen mittels technischer Maßnahmen (Partikelfilter, Techniksubstitution) reduziert werden können, während die Reduktion des Abriebs und der Aufwirbelungen vorranging organisatorischer und verkehrsplanerischer Maßnahmen bedarf (UBA 2009). So werden aufgrund der Anforderungen der Euro-6-Norm die Abgaspartikelemissionen auch bei Fahrzeugen mit Verbrennungsmotoren gegenüber dem heutigen Stand voraussichtlich um circa 90 % zurückgehen (MICHAELIS et al. 2015). Um aber weitergehende Emissionsminderungen zu erreichen, sind eine Verkehrsverlagerung und vor allem eine Verkehrsvermeidung notwendig.

Ähnlich verhält es sich bei der Lärmbelastung: Motorengeräusche werden bei Elektro- und Wasserstofffahrzeugen reduziert, Fahrgeräusche durch andere mechanische Teile – insbesondere den Reifenkontakt auf der Fahrbahn – bleiben jedoch bestehen. Da bei Pkw ab einer Geschwindigkeit von circa 25 km/h und bei Lkw von circa 40 km/h die Fahrbahngeräusche dominanter sind als die Motorengeräusche, werden drastische Lärmreduzierungen beim Einsatz von Elektro- und Wasserstofffahrzeugen nur bei geringen Geschwindigkeiten erreicht werden (UBA 2013; Öko-Institut 2017). Da es hierdurch insbesondere für Blinde und sehbehinderte Menschen zu gefährlichen Situationen kommen kann, wird diskutiert, sogenannte Acoustic Vehicle Alerting Systems (AVAS) zu nutzen, um die Fahrzeuge bei geringen Geschwindigkeiten künstlich lauter zu machen (UBA 2013). Um Verringerungen der Lärmbelastungen durch den Verkehr zu erreichen, sind also wie bei der Feinstaubbelastung technische Maßnahmen allein nicht ausreichend. Verkehrsverlagerungen, zum Beispiel des Güterverkehrs von der Straße auf die Schiene, können für eine große Anzahl von Bürgerinnen und Bürger, die in Straßennähe wohnen, deutliche Verbesserungen bringen. Für einen geringeren Teil der Bevölkerung, der in der Nähe von Bahntrassen wohnt, kann – insbesondere bei nächtlichem Güterverkehr und trotz Lärmschutzmaßnahmen – die Belastung durch Lärm ansteigen (UBA 2016f). In Städten können Reduzierungen des Verkehrslärms durch Verlagerungs- und Vermeidungsmaßnahmen wie die Einrichtung von Fußgängerzonen und Radfahrwegen sowie einen attraktiven ÖPNV erzielt werden (EEA 2014).

Im Sinne des Flächenverbrauchs durch Verkehrsflächen bieten die alternativen Antriebe keinen Mehrwert. Hier bedarf es Vermeidungs- und Verlagerungsstrategien, um eine Verbesserung zu erzielen (Öko-Institut 2017).

162. Neben den direkten Umweltwirkungen in der Nutzungsphase sind den verschiedenen Maßnahmen und Optionen auch die Umweltwirkungen, die in der Vor-

Vorabfassung - wird durch die endgültige Fassung ersetzt.

kette entstehen, anzurechnen. Nur so können die lokalen Ko-Benefits der Nutzungsphase in ein vollständiges Bild der Umwelt- und Gesundheitsauswirkungen der alternativen Optionen im Verkehrssektor eingeordnet werden (Öko-Institut 2017). Dies betrifft die Erzeugung des jeweiligen Kraftstoffes (Strom, Wasserstoff, PtX, Diesel bzw. Benzin) sowie die Aufwendungen zur Herstellung und zum Betrieb der Anlagen, die den jeweiligen Kraftstoff produzieren.

Eine wichtige Voraussetzung für die weitgehende Klimaneutralität batterieelektrischer, Wasserstoff- und PtX-Fahrzeuge ist, dass der Strom, der für das Laden der Fahrzeugbatterien bzw. die Erzeugung von Wasserstoff und PtX verwendet wird, aus regenerativen Quellen stammt. Ansonsten fände eine Verlagerung von Emissionen statt – wenn auch zu Stromerzeugungsanlagen mit entsprechenden Abgasreinigungsanlagen. Bezüglich der Flächennutzung ist anzumerken, dass die direkte und indirekte Elektrifizierung aufgrund des notwendigen Ausbaus der Windenergie- und Solarenergiegewinnung zu einer Erhöhung der Flächennutzung und Flächenkonkurrenz führt. Aufgrund der Wirkungsgrade ist hier jedoch bei der Einführung batterieelektrischer Mobilität mit den geringsten Auswirkungen zu rechnen.

Sowohl für die Herstellung der Anlagen zur Gewinnung von erneuerbarem oder fossilem Strom als auch für die Fahrzeuge inklusive ihrer Antriebe sind weitere Vorketten zu berücksichtigen (s. a. Abschn. 2.3.2, Kap. 3.5 sowie Abschn. 4.2.2.4 und 4.3.6).

4.2.6 Zwischenfazit

163. Im Zuge der Abkehr von der Nutzung fossiler Energieträger wird erneuerbarer Strom, der sowohl direkt als auch indirekt nutzbar ist, zur wesentlichen Energiequelle des Verkehrs der Zukunft. Die Substitution fossiler durch erneuerbare Energieträger ist eine notwendige, jedoch noch keine hinreichende Bedingung für eine nachhaltige Dekarbonisierung des Verkehrs. Würden die bisherigen Verkehrsmuster – mit Blick auf Energieeffizienz, Modal Split und wachsende Verkehrsleistung – beibehalten, würde der ohnehin zunehmende Bedarf an erneuerbaren Energien deutlich stärker ansteigen. Berücksichtigt man ferner den damit einhergehenden Rohstoffbedarf, weitere Umweltwirkungen und auch die Kosten, könnte dann nicht mehr von einer nachhaltigen Dekarbonisierung gesprochen werden. Zudem wäre ein solcher Weg nicht global skalierbar und somit ein Muster ohne Wert für die erforderliche weltweite Dekarbonisierung des Energiesystems. Daher müssen auch die anderen Wege zur Dekarbonisierung zwingend beschritten werden.

Ein sehr wichtiger Ansatzpunkt ist die Verminderung des spezifischen Primärenergieverbrauchs. Werden die vorhandenen Potenziale zur Verbesserung der Energieeffizienz der eingesetzten Fahrzeuge konsequent genutzt, ließe sich deren spezifischer Endenergiebedarf selbst unter Beibehaltung des Verbrennungsmotors als dominierende Antriebstechnologie nahezu halbieren. Mit Blick auf die hohen Umwandlungsverluste, die bei der Herstellung treibhausgasneutraler, kohlenstoffbasierter Kraftstoffe entstehen, würde der spezifische Primärenergieverbrauch hingegen auch dann kaum sinken. Daher wird der Verbrennungsmotor schrittweise durch energieeffizientere Antriebstechnologien ersetzt werden müssen – zumindest im landgebundenen Verkehr. Insbesondere im Pkw-Bereich, aber auch im Güterverkehr werden in den kommenden Jahren zunehmend elektrische Antriebe zum Einsatz kommen. Dabei kann und sollte das Zeitfenster der kommenden Jahre dazu genutzt werden, die Vorbedingungen für eine hochwertige Kreislaufführung von Rohstoffen bereits in die Produktentwicklung zu integrieren, damit Rohstoffe für klimafreundliche Technologien auch künftigen Generationen zur Verfügung stehen. Hierzu besteht konkreter Forschungsbedarf.

Überdies sind Verkehre von der Straße und vom Luftverkehr auf umwelt- und klimaverträglichere Verkehrsmodi zu verlagern. Dazu müssen die Potenziale zum Ausbau des Modal-Split-Anteils des Schienenverkehrs und des Umweltverbundes konsequent erschlossen werden. Noch umwelt- und klimaverträglicher sind allerdings Verkehre, die vollständig vermieden werden können. Gerade auch mit Blick auf weitere Umwelt- und Gesundheitswirkungen des Verkehrs sind Verkehrsvermeidung und die Verlagerung von Straßenverkehren zentrale Handlungsnotwendigkeiten. Aber auch die Herausforderung der Dekarbonisierung wird sich ohne eine ambitionierte Vermeidungs- und Verlagerungsstrategie kaum meistern lassen.

4.3 Pfade zu einem klimaneutralen Verkehr

164. Der Verkehrssektor steht vor einem grundlegenden Umbruch. Es gilt, dessen Chancen und Risiken vorauszusehen und zu gestalten. Der nahezu vollständige Abschied von fossilen Energieträgern in allen Sektoren bedeutet den Übergang zu einer Energieversorgung, die von Wind und Sonne dominiert wird. Dies gilt auch für

Vorabfassung - wird durch die endgültige Fassung ersetzt.

den Verkehr, da der Einsatz von Biokraftstoffen schnell an Verfügbarkeits- und Nachhaltigkeitsrestriktionen stößt. Der Verkehrssektor wird mithin erheblich zur Steigerung der Stromnachfrage beitragen. Der dafür notwendige Ausbau der Stromerzeugungskapazitäten hat aus Umweltsicht und unter Kosten- und Rohstoffaspekten seinen Preis. Deshalb sind auch strukturelle Veränderungen notwendig, die die Bedarfe in allen Sektoren reduzieren.

Der Verkehr in seiner gegenwärtigen Ausprägung hat zahlreiche negative Umweltauswirkungen, die im Zuge einer umfassenden Verkehrswende adressiert werden sollten. So würde beispielsweise der Umstieg von fossil angetriebenen auf elektrische Fahrzeuge zu einer Abnahme nicht nur von CO_2-Emissionen, sondern auch von NO_x- und Feinstaubemissionen führen, an denen EU-weit der European Environment Agency (EEA) zufolge pro Jahr fast 500.000 Menschen vorzeitig sterben (EEA 2016).

Weniger Verkehr bedeutet außerdem weniger Flächenverbrauch, Zerschneidung, Versauerung der Ökosysteme und Schädigung der Biodiversität (Tz. 75 ff.). Würde der (motorisierte) Verkehr insgesamt zurückgehen, könnten auch andere negative Auswirkungen reduziert werden, wie die Zahl der im Verkehr Verletzten und Getöteten.

Im Nachfolgenden werden für die verschiedenen Verkehrsmodi – und übergreifend für den ganzen Sektor sowie den Rohstoffbedarf – einige Wegweiser für einen Pfad hin zu einem treibhausgasneutralen, umweltverträglicheren und auch weniger gesundheitsbelastenden Verkehr aufgezeigt. Darauf aufbauend werden im anschließenden Kapitel 5 zentrale politische Weichenstellungen identifiziert, die in dieser Legislaturperiode angegangen werden sollten. Diese Entscheidungen sind solche, die möglichst bald getroffen werden sollten, denn anderenfalls drohen entweder die klimapolitischen Ziele verfehlt zu werden oder ein späteres abruptes und dann sehr kostenintensives Umsteuern. Die Herausforderung, die die Transformation des Verkehrssystems bedeutet, wird in Kapitel 4.4 dargestellt.

4.3.1 Straßenpersonenverkehr

165. Innerhalb des Verkehrssektors ist der Straßenpersonenverkehr für den höchsten Energieverbrauch und die meisten Treibhausgasemissionen verantwortlich. Er bietet aber auch die breitesten Möglichkeiten zur Dekarbonisierung.

Mit Blick auf die Antriebstechnologie und die Energieversorgung sind grundsätzlich verschiedene Pfade denkbar, um zu einer Treibhausgasneutralität zu gelangen, wie in Abschnitt 4.2.2 gezeigt. Diese sind jedoch nicht als gleichwertig anzusehen. Vielmehr zeigt sich, dass unter ökologischen und technisch-ökonomischen Gesichtspunkten die möglichst weitgehende direkte Elektrifizierung des Straßenpersonenverkehrs klar vorzugswürdig ist. Mit Blick auf die eingesetzte Primärenergie (d. h. erneuerbarem Strom) weist dieser Pfad den mit Abstand höchsten Wirkungsgrad auf. Zudem sind batterieelektrische Fahrzeuge frei von lokalen Schadstoffemissionen und reduzieren so die Gesundheitsbelastungen für die Menschen während der Nutzungsphase.

Synthetische Kraftstoffe, die in Verbrennungsmotoren zum Einsatz kommen, erfordern dagegen um ein Vielfaches höhere Stromerzeugungskapazitäten, was mit hohen ökologischen und finanziellen Kosten einhergeht und die globale Übertragbarkeit dieses Ansatzes fraglich erscheinen lässt. Zudem würden größere Mengen CO_2 als Rohstoff für die Produktion synthetischer Kraftstoffe benötigt, deren treibhausgasneutrale Bereitstellung eine weitere Herausforderung bilden könnte. Wasserstoffbetriebene Brennstoffzellenfahrzeuge weisen zwar einen höheren energetischen Wirkungsgrad auf als Fahrzeuge mit Verbrennungsmotor, aber der im Vergleich zu batterieelektrischen Fahrzeugen immer noch deutlich höhere spezifische Energieverbrauch und der notwendige Infrastrukturaufbau lassen die großflächige Nutzung dieser Technologie ebenfalls weniger attraktiv erscheinen. Unter der Voraussetzung einer ambitionierten Klimapolitik werden Verbrennungsmotoren und wahrscheinlich auch Brennstoffzellen in Zukunft im Pkw-Bereich voraussichtlich lediglich für Nischenanwendungen oder zur Reichweitenerhöhung für bestimmte Fahrprofile Anwendung finden.

166. Auch die direkte Elektrifizierung birgt Herausforderungen. Neben der Umstellung der Fahrzeugflotte wird der Aufbau einer flächendeckenden Ladeinfrastruktur benötigt und der Bedarf an bestimmten Rohstoffen steigt mit einer weiten Verbreitung von batterieelektrischen Fahrzeugen drastisch an. Lösungen für eine nachhaltige Gewinnung und eine deutlich bessere Kreislaufführung dieser Rohstoffe müssen erarbeitet werden. Außerdem muss der Ausbaupfad der erneuerbaren Energien an die steigende Stromnachfrage aus dem Verkehrssektor angepasst werden. Zudem bedeutet diese technologische Transformation eine enorme politische und wirtschaftliche Herausforderung für ein Land, dessen stärkste Branche bisher vor allem auf den Verbrennungsmotor

Vorabfassung - wird durch die endgültige Fassung ersetzt.

gesetzt hat (vgl. Kap. 4.4). Produktionsanlagen und auch Arbeitsplätze, die bisher an die Produktion von Verbrennungsmotorfahrzeugen gebunden waren, müssen auf die Elektrifizierung des Pkw ausgerichtet werden. Dem stehen jedoch auch neue ökonomische Chancen gegenüber, beispielsweise bei der Energieversorgung des Verkehrs, die bisher im Wesentlichen auf Importen fossiler Energieträger basiert.

167. Unter Berücksichtigung der Ziele des Klimaabkommens von Paris und der langen Nutzungsdauer von Pkw wird deutlich, dass der technologische Wandel bei den Antriebstechnologien – mit Blick auf neu zugelassene Fahrzeuge – spätestens bis Mitte der 2030er-Jahre vollzogen sein muss. Angesichts des benötigten Aufbaus von Infrastruktur, Produktions- und Recyclingkapazitäten muss die Transformation daher sehr kurzfristig und entschlossen angegangen werden. Nur durch schnelles Umsteuern kann die Transformation hin zu einem nahezu treibhausgasneutralen Straßenpersonenverkehr bis zur Mitte des Jahrhunderts abgeschlossen werden. Damit die kumulierten Emissionen bis zur Umstellung der Flotte auf elektrische Antriebe nicht bereits das verbleibende CO_2-Budget des Verkehrssektors übersteigen, ist parallel zur technologischen Transformation eine offensive Effizienzstrategie für die Pkw-Flotte zu verfolgen.

168. In einem nachhaltigen Mobilitätssystem darf aber auch ein elektrifizierter MIV nicht weiter wachsen. Soll die nachhaltige Dekarbonisierung des Verkehrs gelingen, muss sowohl die Anzahl der Fahrzeuge als auch die Zahl der von ihnen zurückgelegten Kilometer sinken. Neben dem hierdurch reduzierten Energiebedarf, der die Dekarbonisierung des verbleibenden Energieverbrauchs erleichtert, und dem verminderten Rohstoffbedarf können durch eine Einschränkung des MIV Mensch und Umwelt in vielfältiger Weise entlastet werden.

Während sich im Fernverkehr und im Stadtverkehr Erfolg versprechende Ansätze zur Verminderung des MIV klar abzeichnen, besteht die größte Herausforderung bei Mittelstreckenverkehren im nicht-urbanen Raum. Im Fernverkehr bietet der Schienenverkehr bereits heute zwischen großen Städten insbesondere in der Mitte Deutschlands eine attraktive Alternative zum Pkw, die es weiter zu stärken gilt. Auch Fernbusse können durch ihren Bündelungseffekt zu einer Emissionsminderung beitragen. Im städtischen Bereich stehen die Schaffung nahräumlicher Strukturen und die Stärkung des Umweltverbunds im Vordergrund. Die Nutzung innovativer Konzepte, die sich durch Digitalisierung und Autonomisierung eröffnen, ermöglicht die bessere Verknüpfung von Pkw-Verkehr und Umweltverbund, wobei der Letztere gestärkt werden und dabei stets die Klima-, Umwelt- und Gesundheitsziele im Zentrum stehen sollten.

Für Mittelstreckenverkehre in der Fläche ist der Lösungsweg weniger klar vorgezeichnet. Zum einen sollte die Verkehrsnachfrage durch intelligente, planerische Maßnahmen wie eine konsequente integrierte Siedlungs- und Verkehrsentwicklung und zielkonforme Anreize gedämpft werden. Um den verbleibenden Verkehr umweltverträglicher zu gestalten und die Zahl der Fz-km zu senken, sind neue Konzepte erforderlich, die – regional differenziert – auch eine zunehmende Verschmelzung von bisherigem ÖPNV und privatem MIV mit sich bringen können. Durch Digitalisierung, Vernetzung und Autonomisierung können ländliche Verkehre stärker gebündelt und damit effizienter gestaltet werden.

4.3.2 Straßengüterverkehr

169. Der Straßengüterverkehr stellt die vielleicht größte Herausforderung für die Dekarbonisierung des Verkehrs dar. Er ist – sowohl in der Vergangenheit als auch mit Blick auf die prognostizierte Zukunft – durch hohe Wachstumsraten gekennzeichnet. Effizienzfortschritte drohen durch das Wachstum der Verkehrsleistung neutralisiert oder gar überkompensiert zu werden. Für eine erfolgreiche Strategie ist zwischen Transporten im Nahverkehr (bis 200 km) und mit kleineren Lkw (bis 12 t zGG) sowie solchen im Fernverkehr mit schweren Lkw (bis 40 t zGG) zu unterscheiden.

Für kleinere Lkw im Nahverkehr ist das verfügbare technologische Portfolio ähnlich dem im Pkw-Verkehr, wobei auch die relativen Stärken und Schwächen der verschiedenen Lösungen ähnlich zu bewerten sind. Folglich ist auch hier eine weitgehende direkte Elektrifizierung mittels batterieelektrischer Fahrzeuge anzustreben.

Im Fernverkehr mit schweren Lkw, der für circa 80 % der Emissionen im Straßengüterverkehr verantwortlich ist, kommen nach derzeitigem Stand der Technik rein batterieelektrische Fahrzeuge nicht infrage. Das sehr hohe Volumen und Gewicht der mitzuführenden Batterien steht dem im Wege. Um dennoch die Wirkungsgradvorzüge der direkten Elektrifizierung zu nutzen, können Schwerlast-Lkw über Oberleitungen mit elektrischem Strom versorgt werden. Dabei würden Teile des Autobahnnetzes mit Oberleitungen ausgestattet. Wege abseits des elektrifizierten Autobahnnetzes können entweder über Batterien mit begrenzter Reichweite oder mittels

Vorabfassung - wird durch die endgültige Fassung ersetzt.

Hybridkonzepten (ergänzender Verbrennungsmotor bzw. Brennstoffzelle) zurückgelegt werden. Welche Technologie sich für die Erweiterung der Reichweite langfristig als vorzugswürdig erweist (Batterie, Brennstoffzelle, Verbrennungsmotor mit synthetischen Kraftstoffen), ist derzeit noch nicht klar und zudem vom jeweiligen Fahrprofil abhängig, weshalb hier eine breitgefächerte Förderpolitik geboten scheint.

Um die Tragfähigkeit eines Straßengüterverkehrs auf Basis von Oberleitungs-Lkw zu untersuchen, werden derzeit Tests auf zwei deutschen Autobahnabschnitten in Hessen und Schleswig-Holstein und auf zwei Teilstücken der Bundesstraße 462 in Baden-Württemberg sowie in anderen Ländern vorbereitet. Für die Vertiefung solcher Tests sollten ausreichende Mittel zur Verfügung gestellt werden. Bei erfolgreicher Bewährung des Ansatzes sollten schnell Konzepte für dessen großskalige Umsetzung entwickelt und auf den Weg gebracht werden. Im Sinne einer möglichst raschen und gleichzeitig effektiven Marktdurchdringung des direkt-elektrischen Straßengüterverkehrs sollten zunächst wichtige Pendelstrecken bzw. mit geeigneten Start-Ziel-Relationen hochfrequentierte Autobahnabschnitte mit einer Oberleitungsinfrastruktur ausgerüstet werden. Die Elektrifizierung des deutschen Autobahnnetzes könnte dabei als Keimzelle für eine europäische Lösung fungieren.

Auch für den Straßengüterverkehr gilt, dass die Dekarbonisierung der Energieversorgung der unvermeidliche letzte Schritt ist, aber zugleich die Potenziale für Effizienzverbesserung, Vermeidung und Verlagerung konsequent auszuschöpfen sind. Neben der Erschließung der skizzierten fahrzeugseitigen Effizienzpotenziale (z. B. durch Verbrauchsgrenzwerte für Lkw) bietet die Digitalisierung neue Chancen zur Senkung des spezifischen Energieverbrauchs im Güterverkehr, beispielsweise durch das sogenannte Platooning, bei dem durch ein Steuerungssystem verbundene Fahrzeuge in sehr geringem Abstand hintereinander fahren können und so Kraftstoff sparen, oder durch eine für die jeweilige Topografie optimierte Fahrweise. Zentrales Element für die Verlagerung des Straßengüterverkehrs ist dabei die Ertüchtigung und der gezielte Ausbau des Schienennetzes, um die Transportkapazität auf der Schiene deutlich zu erhöhen. Des Weiteren kann die Verlagerung durch einen Ausbau der Infrastruktur für den Kombinierten Verkehr (KV) – beispielsweise zusätzliche und effizientere KV-Terminals – unterstützt werden (SRU 2012, Tz. 252 ff.). Grundsätzlich sollte gelten, dass die Verkehrsinfrastrukturplanung an den gesetzten umwelt- und klimapolitischen Zielen ausgerichtet wird und nicht der Ermöglichung eines prognostizierten (Güter-)Verkehrswachstums dient – gerade wenn dieses (z. B. durch kürzere Wege oder eine effizientere Logistik) vermeidbar ist. Ein wichtiges übergreifendes Element, das zur Verlagerung und in begrenztem Maße auch zur Vermeidung von Güterverkehren auf der Straße beitragen kann, ist überdies die Anlastung der vollen externen Kosten des Verkehrs.

4.3.3 Schienenverkehr

170. Der Schienenverkehr ist bereits heute ein vergleichsweise energieeffizientes und klimafreundliches Verkehrsmittel. Da der Schienenverkehr nach Verkehrsleistung tkm/Pkm schon zu 95 % elektrisch fährt, kann er einfacher als andere Verkehrsträger auf erneuerbare Energien umgestellt werden. Mittels Elektrifizierung weiterer Streckenabschnitte kann seine Umweltverträglichkeit weiter verbessert werden. Auf Strecken, deren Elektrifizierung aufgrund geringer Frequentierung bzw. hoher Investitionskosten in keinem sinnvollen Kosten-Nutzen-Verhältnis steht, lassen sich Treibhausgasemissionen durch neue Antriebskonzepte (bspw. Schienenfahrzeuge mit Brennstoffzellenantrieb) vermeiden. Durch eine Stärkung des Modal-Split-Anteils des Schienenverkehrs – zulasten des motorisierten Straßenverkehrs und des Luftverkehrs – können somit Energieverbrauch und Treibhausgasausstoß reduziert werden. Dabei werden in der Regel im Güterverkehr größere Verlagerungspotenziale als im Personenverkehr gesehen. Bis zum Jahr 2050 sollte der Modal-Split-Anteil der Schiene im Güterverkehr auf mindestens 30 % erhöht werden.

Eine erfolgreiche Verlagerungsstrategie muss dabei einerseits die Wettbewerbsfähigkeit und Attraktivität des Schienenverkehrs als Verkehrsmittel stärken und andererseits die infrastrukturellen Voraussetzungen für einen starken Zuwachs beim Schienenverkehr schaffen. Zentral für eine Kapazitätserhöhung des Schienenverkehrs ist der Ausbau der Schieneninfrastruktur auf hochfrequentierten Streckenabschnitten und an wichtigen Knotenpunkten. Zentrales Steuerungsinstrument hierfür ist die Bundesverkehrswegeplanung, die weiterzuentwickeln und künftig an den klimapolitischen Zielen auszurichten ist.

Zur Stärkung von Kapazität und Attraktivität des kombinierten Güterverkehrs ist die Verfügbarkeit und Effizienz von Umladestationen zu erhöhen. Weitere Kapazitäts- und Attraktivitätserhöhungen im Güterverkehr sind durch technische Modernisierungen und Verbesserungen im operativen Betrieb erreichbar. Im Personenverkehr kann die Nachfrage beispielsweise durch eine verbesserte Fahrplangestaltung gestärkt werden. Hier wären

Vorabfassung - wird durch die endgültige Fassung ersetzt.

beispielsweise verbesserte Anschlüsse im Schienen(fern)-verkehr („Deutschlandtakt“) sowie eine Verbesserung der Zubringer- und Verteilverkehre zu nennen.

Überdies wird der Modal Split auch über die relativen Kosten der verschiedenen Verkehrsmittel gesteuert. Sowohl die Gestaltung von Steuern und Abgaben auf den Energieverbrauch (z. B. Belastung von Fahrstrom) als auch die Bepreisung der Infrastrukturnutzung (z. B. Trassenpreise im Schienenverkehr) müssen auf Kostengerechtigkeit sowie Konsistenz mit den Klimazielen geprüft und gegebenenfalls angepasst werden.

4.3.4 Schiffsverkehr

171. Aufgrund der langen Seewege und der transportierten Tonnage sind die technischen Optionen einer Dekarbonisierung der Seeschifffahrt stark eingeschränkt. Batterieelektrische Antriebe können bislang nur im Fährverkehr eingesetzt werden. Mit der Weiterentwicklung von Batterien könnte der Einsatz im seegebundenen Zubringerverkehr (Feederdienst) möglich werden. Für Seereisen zwischen Kontinenten scheinen Batterien jedoch auch künftig keine Option zu sein. Erprobt wird derzeit, die Bordstromversorgung durch Brennstoffzellen zu gewährleisten. Dabei wird allerdings Schiffsdiesel eingesetzt, der an Bord zu Wasserstoff umgewandelt wird. Inwieweit die Technik zukünftig genutzt werden kann, hängt auch davon ab, ob Brennstoffzellen den Bedingungen auf See standhalten.

Für die Bordstromversorgung während der Liegezeiten in Häfen besteht die Möglichkeit, anstelle der Stromerzeugung an Bord Landstrom zu beziehen. Diese Option ist mit Blick auf die Luftbelastung durch eine schiffseigene Stromerzeugung vorteilhaft und wird als Teil des Environmental Ship Index (ESI) angerechnet. Allerdings wird auf Landstrom in Deutschland unter anderem die EEG-Umlage erhoben, sodass die Versorgung der Seeschiffe mit umweltschonenderem Strom ökonomisch wenig attraktiv ist.

172. Technisch bereits möglich ist die Nutzung von LNG auf Schiffsneubauten sowie eine Umrüstung der bestehenden Flotte. Zum Einsatz kommt zunächst fossiles Erdgas, das zukünftig durch Biogas oder synthetisches Methan ersetzt werden kann. Eine baldige Marktdurchdringung im Schiffsneubau und beim Austausch der Antriebstechnik würde voraussichtlich zu sinkenden Preisen der Technologie und damit steigender Attraktivität führen. Der Einsatz von LNG mindert die Treibhausgasemissionen durch den Seeschiffsverkehr und die Schadstoffbelastung in den Häfen. Notwendig ist allerdings eine flächendeckende Infrastruktur sowie einheitliche Regeln für das Bunkern von LNG. Diese fehlen in Deutschland, da die Länder unterschiedliche Sicherheitsanforderungen stellen, die – beispielsweise durch das verpflichtende Bereithalten eines Schleppers während des Bunkervorgangs – mit Zusatzkosten einhergehen können. Als Übergangstechnologie bis zur globalen Sicherstellung der Versorgung mit LNG können Dual-Fuel-Antriebe (LNG und Schiffsdiesel) eingesetzt werden.

Zudem könnte die Dekarbonisierung durch Substitution von Schiffsdiesel durch Biokraftstoffe der 2. und 3. Generation und synthetische Kraftstoffe vorangebracht werden. Allerdings ist global der Kraftstoffverbrauch der Seeschifffahrt sehr hoch, sodass zusätzliche Effizienzsteigerungen in der Antriebstechnologie und durch das Reisemanagement erforderlich sind. Die spezifische Effizienz steigt beispielsweise durch eine Verminderung der Reisegeschwindigkeit. Diese Maßnahme wird aktuell genutzt, um Kraftstoffkosten zu reduzieren.

4.3.5 Luftverkehr

173. Im Luftverkehr ist der Umstieg auf batterieelektrischen bzw. Brennstoffzellenantrieb gegenwärtig nicht absehbar. Daher wird die Energieversorgung des Luftverkehrs möglicherweise mit Biokraftstoffen der zweiten und dritten Generation und vor allem mit synthetischen Kraftstoffen (Power-to-Liquid – PtL) erfolgen müssen (SCHMIDT et al. 2016). Gerade im Luftverkehr sind die Vermeidung und – im nationalen Kontext – Verlagerung ein sehr wichtiger Ansatzpunkt, um das prognostizierte Wachstum von Verkehrsleistung und Energieverbrauch zu dämpfen. Hierbei spielt eine faire Bepreisung eine zentrale Rolle. Bei der Regulierung der Treibhauswirkungen des Luftverkehrs muss neben CO_2 die Klimaschädlichkeit weiterer Emissionen in großer Höhe beachtet werden. Eine wesentliche Herausforderung der klimapolitischen Regulierung liegt auch darin, dass der große Anteil internationaler Verkehre langwierige Ansätze über die ICAO erforderlich macht.

4.3.6 Verantwortungsbewusster Umgang mit Rohstoffen

174. Die negativen Umweltauswirkungen, die bei der Gewinnung von Erdöl für die Kraftstoffherstellung entstehen, werden durch einen Umstieg auf Elektromobilität abnehmen. Dies betrifft sowohl Einzelfälle wie Tanker-

Vorabfassung - wird durch die endgültige Fassung ersetzt.

unglücke und havarierte Ölplattformen als auch die latenten Folgen von Boden- und Wasserverunreinigungen und Leitungsschäden. Es besteht jedoch das Risiko, dass diese lediglich durch andere Umweltschäden abgelöst werden.

Der Ausbau der Elektromobilität wird zu einem zusätzlichen Verbrauch von Rohstoffen führen, die außerhalb Deutschlands abgebaut werden, zum Beispiel in China, Afrika oder Südamerika. Eine steigende Nachfrage nach Massenrohstoffen wie Kupfer und Aluminium, nach Gold, Silber, Lithium und Kobalt sowie nach Kleinmengenrohstoffen wie Seltene Erden führt zu einem weiteren Ausbau der Rohstoffförderung. Mehr Anlagen zur Stromgestehung, eine beschleunigte Produktion von Elektrofahrzeugen und der Ausbau der Versorgungsinfrastruktur werden zu einem mittelfristigen Nachfragehoch bei einigen Rohstoffen führen. Je größer und drängender die Nachfrage, desto lohnender die Ausbeutung von Vorkommen mit geringeren Gehalten und umso größer auch der Druck auf bisher geschützte Gebiete wie die Arktis oder die Tiefsee.

Die Frage nach der Rohstoffsicherheit wird oft mit einem verbesserten Recycling und einer Rückführung von Rohstoffen in den Kreislauf beantwortet. In der Realität gibt es jedoch vielfältige Gründe, warum dies nicht ausreichend funktioniert bzw. Recyclingpotenziale nicht optimal ausgeschöpft werden. Dazu zählt zum Beispiel, dass der Materialkreislauf auch derzeit wertvolle Rohstoffe, wie Gold, Platin und Seltene Erden, verliert. Dies geschieht gerade im Fahrzeugbereich durch den Export der Gebrauchtprodukte. Aber auch Recyclingprozesse, die nur auf einzelne Massenrohstoffe zielen, oder Materialverbünde mit sehr geringen Anteilen an wertvollen Rohstoffen, die nur unter hohem Aufwand abgetrennt werden könnten, führen zu erheblichen Rohstoffverlusten. Dazu kommt die Skepsis gegenüber Sekundärrohstoffen bezüglich Qualität und zuverlässiger Verfügbarkeit.

Es ist also nicht ausreichend, auf die Notwendigkeit der Kreislaufführung zu verweisen. Aufgabe der Politik ist es vielmehr, kurzfristig die Rahmenbedingungen für eine Kreislauffähigkeit zu schaffen. Gerade in einem vergleichsweise abgegrenzten, an der Startlinie zu einer Transformation stehenden Sektor wie dem Verkehr besteht dazu die Chance. Die Pflicht, den Lebensweg der im Produkt verwendeten Rohstoffe vollständig zu dokumentieren, kann ein erster Schritt sein, um „Rohstoffleckagen“ sichtbar zu machen.

Bei der Ausgestaltung sollten die folgenden Punkte bedacht werden:

- Die negativen Auswirkungen der Rohstoffbereitstellung sollten so weit wie möglich verringert werden.
- Es sollte erfasst werden, welche Rohstoffe bereits im anthropogenen Lager liegen, und welche dazu kommen.
- Es sollte überlegt werden, wie sich die im einzelnen Produkt verwendeten Rohstoffe dokumentieren lassen und wie ihre Eignung für ein hochwertiges Recycling gefördert werden kann.
- Der Begriff „hochwertiges Recycling“ sollte so festgelegt werden, dass das Ziel – gleiche oder höherwertige Nutzung eines Rohstoffs bzw. Materials – unzweideutig ist.
- Der Aufbau von Recycling-Strukturen in Schwellen- und Entwicklungsländern sollte politisch unterstützt und von den Herstellern forciert werden, um die Herstellerverantwortung nicht an den europäischen Grenzen enden zu lassen.

Mit Blick auf die lange Lebensdauer von Fahrzeugen und die bevorstehende Umstellung auf Elektromobilität kann jetzt durch eine enge Kooperation zwischen Planung und Entwicklung mit den Akteuren der Entsorgungsphase die Idee eines kreislaufgerechten Designs umgesetzt werden. Die Abwägungen zwischen Gewicht bzw. Rohstoffkosten (Miniaturisierung) und Rückholbarkeit (Trennbarkeit, Rezyklatmengen) über die Materialauswahl und die Einbausituationen kann nur produktscharf auf der Fachebene erfolgen. Diese Kooperation muss aber politisch flankiert bzw. eingefordert werden. Die Rolle der Entsorger als Rohstofflieferanten und damit als Alternative zur Bergbauindustrie ist deutlich ausbaufähig. Dies erfordert Investitionen in Recyclingkapazitäten, die nach einer rohstoffintensiven Phase des Bestandsaufbaus dann einen merklichen Anteil von Rohstoffbedarfen decken können. Bestehende, gut funktionierende Recyclingkreisläufe im Fahrzeugbereich beweisen, welche hohen Potenziale in ausgereiften und funktionierenden Kreisläufen liegen. Zu diesen zählen das Recycling von Aluminium, von Blei aus Bleisäurebatterien, von Stahl aus Schredderschrott oder auch von Platingruppenmetallen aus Autoabgaskatalysatoren. Das Wissen um die mittelfristige Verfügbarkeit von kritischen Rohstoffen aus Sekundärrohstoffen sollte sich positiv auf Märkte und auf die Weiterentwicklung von Technologien auswirken.

Vorabfassung - wird durch die endgültige Fassung ersetzt.

4.4 Transformation des Verkehrssystems: Industrie und Gesellschaft

4.4.1 Stabilität des sozio-technischen Systems und der Automobilbranche

175. Wie in Kapitel 4.3 dargestellt, stehen eine Reihe technischer Optionen zur Dekarbonisierung des Verkehrs zur Verfügung. Für die Transformation des Verkehrssystems ist dies eine notwendige, aber nicht hinreichende Voraussetzung. Aus Sicht der Transformationsforschung stellt das heutige Verkehrssystem ein über viele Jahrzehnte entstandenes sozio-technisches System dar, das über ein ausgeprägtes Maß an Stabilität gegenüber Veränderung durch Innovationen und externen Schocks verfügt.

Dabei war die Dominanz des verbrennungsmotorgetriebenen Individualverkehrs am Ende des 19. Jahrhunderts nicht abzusehen. Unter den zu diesem Zeitpunkt neuen Mobilitätstechnologien dominierten elektrische Straßenbahnen und Elektrofahrzeuge das Straßenbild (GEELS 2005, S. 688). Es gab jedoch zahlreiche Gründe, weshalb sich der Verbrennungsmotor trotz einiger technischer Nachteile aus einer Nischenposition heraus durchsetzte, wie die Fließbandfertigung und die günstige Verfügbarkeit des damaligen Abfallproduktes Benzin (UNRUH 2000, S. 821).

Begünstigt durch ökonomische Skaleneffekte führte die zunehmende Dominanz des Automobils mit Ottomotor im Laufe des 20. Jahrhunderts zu der Herausbildung des heutigen stabilen sozio-technischen Systems. Dies besteht aus Automobilkonzernen mit ihrem spezifischem Know-how, Firmenkultur und einem Netzwerk an Zulieferbetrieben, zudem der physischen Infrastruktur von Straßen und Tankstellen (Abb. 4-20). Aber auch die entsprechenden Politiken und Regulierungsansätze, die sich primär am verbrennungsmotorisierten Individualverkehr orientieren, wie Mineralölsteuern und Entfernungspauschale, lassen sich zu diesem sozio-technischen System zählen. Koevolutionär bildete sich, insbesondere in den USA aber auch in Deutschland, eine autozentrierte Mobilitätskultur heraus, welche eng verbunden ist mit ge-

Abbildung 4-20

Die verbrennungsmotorgetriebene Mobilität als sozio-technisches System

Quelle: GEELS 2002, S. 1258, angepasst

Vorabfassung - wird durch die endgültige Fassung ersetzt.

sellschaftlichen Wertvorstellungen von Individualität, Konsum, Wohlstand und Freiheit (URRY 2006). Auch in der Stadtplanung und somit letztlich auch im Stadtbild spiegelt sich die tiefe Verankerung des automobilen Verkehrs wider. Basierend auf der Idee, Wohnen und Arbeiten in der Stadt auch funktional und räumlich zu trennen, setzte sich nach dem 2.Weltkrieg auch in Deutschland das Planungsleitbild der autogerechten Stadt durch (REICHOW 1959). Mit der hier vorgesehenen Einrichtung zentraler Verkehrsachsen für den Automobilverkehr wurde die kulturelle und technologische Dominanz des Autos in den Städten auch baulich zementiert und weiter verstärkt.

Für die klimapolitisch notwendige Dekarbonisierung des Verkehrs ist das sozio-technische System basierend auf Individualverkehr und Verbrennungsmotoren insofern relevant, als dieses über ein starkes Maß an Pfadabhängigkeit und Stabilität verfügt, welches einen Strukturwandel erschwert. Industrie, Politik, Wissenschaft sowie Konsumentinnen und Konsumenten orientieren sich weiterhin primär an der autozentrierten Mobilität des 20. Jahrhunderts, was zu einem technisch-institutionellen Lock-in und einer hohen Trägheit des gesamten Sektors führt (UNRUH 2000, S. 826). Als ein zentraler Akteur des sozio-technischen Systems hat insbesondere die existierende Automobilindustrie ein Interesse an dessen Stabilität, da über Jahrzehnte in die existierenden Technologien und Arbeitsprozesse investiert wurde und die getätigten Investitionen sunk investments darstellen. Da das Geschäftsmodell auf dem Verkauf von Verbrennungsmotorbetriebenen Kraftfahrzeugen basiert und innovative Ideen im Zweifel auch das bisherige Geschäftsmodell untergraben könnten (SRU 2016a, S. 30), wird primär auf die technische Optimierung existierender Verbrennungsmotoren und inkrementelle Gewichtsreduzierungen der Fahrzeuge gesetzt (WELLS und NIEUWENHUIS 2012, S. 5). Alternative Technologien wie batterieelektrische Fahrzeuge und neue Geschäftsmodelle wie Carsharing werden daher oftmals zunächst von kleineren, nicht-etablierten Akteuren in Nischen erprobt (ebd.).

4.4.2 Deutschland in der globalen Mobilitätswende

176. Aus Sicht der Transformationswissenschaft kann die Politik durch geeignete Rahmensetzungen zum sektoralen Strukturwandel beitragen. Wie bereits früher vom SRU dargestellt, hat Deutschland prinzipiell gute Voraussetzungen, um Vorreiter ökologischer Transformationen zu werden. Dies liegt unter anderem an der innovationsfreundlichen engen Vernetzung zwischen Unternehmen und Forschungseinrichtungen, der staatlichen Unterstützung für Nachhaltigkeitsforschung und einer breiten Unterstützung für eine aktive Umweltpolitik in der Bevölkerung (SRU 2016a, S. 34).

Sektorale Transformationen können jedoch nicht im Rahmen des Nationalstaats allein betrachtet und gestaltet werden. Vielmehr finden diese in einem komplexen Mehrebenensystem statt, welches von der internationalen bis zur lokalen Ebene reicht (SRU 2016a, S. 33). Damit kommt Nationalstaaten mit einer ambitionierten Umweltpolitik die Rolle von Vorreitern zu, die mit ihren Leitmärkten technische Standards setzen können und neue Exportindustrien schaffen (ebd.). Während Deutschland im Bereich der Energiewende eine solche Vorreiterrolle einnimmt, werden die Chancen im Verkehrsbereich bisher nicht ausreichend genutzt.

177. Aufgrund der wirtschaftlichen Bedeutung des Automobilsektors für die deutsche wie auch andere Volkswirtschaften ist die Politik bisher vorsichtig, strenge Umweltvorschriften für CO_2-Emissionen und Luftschadstoffe für den Sektor durchzusetzen, welche einen Pfad für innovative Akteure und alternative Technologien eröffnen würden (WELLS und NIEUWENHUIS 2012; OLTRA und SAINT JEAN 2009). Als jüngstes Beispiel hierfür kann der deutsche und europäische Umgang mit dem Dieselabgasskandal dienen. Die Stabilität des sozio-technischen Regimes zeigt sich hier beispielsweise an dem großen Einfluss der Automobilindustrie auf die sie betreffende Gesetzgebung und die mangelnde Durchsetzung derselben. Als für die Regulierung des Straßenverkehrs zuständige Behörde ist das Kraftfahrt-Bundesamt (KBA) für die Typenzulassung von Neufahrzeugen und die damit verbundene Prüfung der Luftschadstoffemissionen von neu zugelassenen Fahrzeugen verantwortlich. Aufgrund von Unzulänglichkeiten des bisherigen Zulassungsverfahrens, besonders die Verwendung des europäischen NEFZ-Testverfahrens, ist das KBA seiner eigentlichen Aufgabe der Kontrolle der Einhaltung von Emissionsgrenzwerten bisher jedoch nicht ausreichend nachgekommen (MOCK und GERMAN 2015). Weiterhin blieb es, anders als in den USA, bisher weitgehend den Herstellern überlassen, die Emissionen im praktischen Einsatz zu überprüfen (MAYER 2016). Der Untersuchungsausschuss des Europäischen Parlaments zum Abgasskandal konstatierte deshalb in seinem Abschlussbericht, dass Deutschland gegen seine rechtliche Verpflichtung verstieß, das Verbot von unerlaubten Abschalteinrichtungen bei der Abgasreinigung zu überwachen und gegenüber den Fahrzeugherstellern durchzusetzen

Vorabfassung - wird durch die endgültige Fassung ersetzt.

(Europäisches Parlament 2017, S. 11). Andere Akteure sprechen in diesem Zusammenhang auch von „regulatory capture", also einer Vereinnahmung der Regulierungsbehörden durch die zu regulierende Industrie (Süddeutsche Zeitung 18.05.2016; Transport & Environment 2016).

Allerdings zeigt auch die europäische Politik wenig Bereitschaft zu einer grundsätzlichen Neuausrichtung. Der Dieselskandal wurde nicht genutzt, den bisher nicht eingehaltenen Grenzwerten für Luftschadstoffe auch in der Praxis volle Geltung zu verschaffen, obwohl das Typgenehmigungsverfahren derzeit überarbeitet wird. Stattdessen setzte sich die Europäische Kommission und eine Mehrheit der Mitgliedstaaten der EU, darunter Deutschland, mit der Forderung durch, mittels Konformitätsfaktoren höhere NO_X-Grenzwerte für den Realbetrieb zu etablieren, welche die Euro-6-Abgasnorm zunächst um 110 % überschreiten (SKEETE 2017). Daneben verdeutlichen auch die Ergebnisse des „Nationalen Forum Diesel" („Dieselgipfel"), dass in der Öffentlichkeit weiterhin vor einer kritischen Auseinandersetzung über die zukünftige Ausrichtung der deutschen Automobilbranche und einen Strukturwandel hin zur Elektromobilität zurückgeschreckt wird.

China als Leitmarkt für Elektromobilität

178. Deutlich konkreter ist das Vorhaben Chinas, globaler Leitmarkt für Elektromobilität zu werden. Da China in der existierenden fossilen Automobilindustrie mit ihren Pfadabhängigkeiten Schwierigkeiten hat, zu den globalen Weltmarktführern aufzuschließen, wird mit der Elektromobilität der explizite Versuch unternommen, einen heimischen Leitmarkt zu etablieren (DIJK et al. 2013, S. 141). In diesem Kontext ist auch die Entscheidung der chinesischen Regierung zu verstehen, 2019 einen Flottenanteil von 10 % für batterieelektrische und Hybridfahrzeuge an den Kfz-Neuverkäufen zu erzielen (Süddeutsche Zeitung 28.09.2017). Bis 2020 soll der Marktanteil heimischer Hersteller am Gesamtverkauf von Elektrofahrzeugen bei 70 % liegen (Süddeutsche Zeitung 30.10.2016). Während Deutschland in der technologischen Entwicklung der Elektromobilität derzeit zu den führenden Standorten gehört, sehen Branchenbeobachter die Volksrepublik China schon heute als führenden Industrie- und Produktionsstandort sowie größten Absatzmarkt für die Elektromobilität (Roland Berger – Automotive Competence Center und fka 2017). So lagen allein im Jahr 2015 die Subventionen für Elektrofahrzeuge bei 1,1 Mrd. Euro. Bis 2030 strebt das Land einen 40 bis 50 %-Anteil dieser Fahrzeuge an den Neuzulassungen an. Währenddessen fördert die deutsche Bundesregierung den Erwerb von Elektrofahrzeugen durch den Umweltbonus („Kaufprämie") im Zeitraum 2016 bis 2019 mit insgesamt 600 Mio. Euro (BAFA 2017). Über das Ziel der Bundesregierung hinaus, bis 2020 eine Million zugelassene Elektrofahrzeuge zu erreichen, gibt es in Deutschland derzeit kein mittelfristiges Ziel für den Anteil der Elektromobilität an den Neuzulassungen.

Kostensenkungen und Skaleneffekte bei batterieelektrischen Fahrzeugen

179. Voraussetzung für eine entsprechende Marktdurchdringung batterieelektrischer Kfz sind Kostensenkungen und technische Fortschritte bei der Speichertechnologie. In den letzten Jahren haben die rapiden Kostensenkungen der notwendigen Li-Ionen-Batterien alle Erwartungen übertroffen. Ende 2010 wurden von Marktbeobachtern Preise im Bereich von 225 bis 500 USD/kWh für das Jahr 2020 prognostiziert (FAIRLEY 2011). Ein Preis von 227 USD/kWh wurde allerdings bereits Ende 2016 erreicht und entspricht damit einem Rückgang um mehr als Dreiviertel seit 2010 (s. Abb. 4-21; McKinsey & Company 2017). Während die Wettbewerbsfähigkeit von Elektrofahrzeugen stark von den Strompreisen, den Preisen für fossile Energieträger und dem regulatorischen Regime abhängt, erwarten Marktbeobachter, dass batterieelektrische Fahrzeuge insbesondere ab 150 USD/kWh global wettbewerbsfähig mit Fahrzeugen mit Verbrennungsmotoren sein werden (NYKVIST und NILSSON 2015, S. 330). Die mit dem bereits steigenden Absatz von Elektrofahrzeugen verbundenen Skaleneffekte könnten diese Entwicklung noch beschleunigen. Aus Sicht von Marktbeobachtern stehen dem Automobilbereich damit die größten strukturellen Veränderungen seit der Einführung der Fließbandfertigung durch Henry Ford bevor (AlixPartners 2016). In diesem Zusammenhang ist die deutsche Automobilindustrie im Innovationswettbewerb mit neuen internationalen Wettbewerbern mit großen Herausforderungen konfrontiert. Sofern es den deutschen Autoherstellern nicht gelingen sollte, das notwendige Know-how für eine sich schnell digitalisierende und zunehmend dienstleistungsorientierte Mobilitätsgesellschaft zu erwerben (s. Kap. 4.5), besteht die Gefahr, dass die deutsche Automobilindustrie im Zweifel zu Zulieferbetrieben für innovative Technologiekonzerne und IT-Startups reduziert werden könnte (BARDT 2016).

Als Prototyp eines Autoherstellers neuen Typs gilt das amerikanische Unternehmen Tesla Motors, welches ausschließlich batterieelektrische Fahrzeuge herstellt. Es hatte sich zunächst auf den Verkauf von hochpreisigen batterieelektrischen Fahrzeugen spezialisiert und dominiert damit inzwischen den US-amerikanischen Markt für Oberklasselimousinen vor den bisher vorherrschen-

Vorabfassung - wird durch die endgültige Fassung ersetzt.

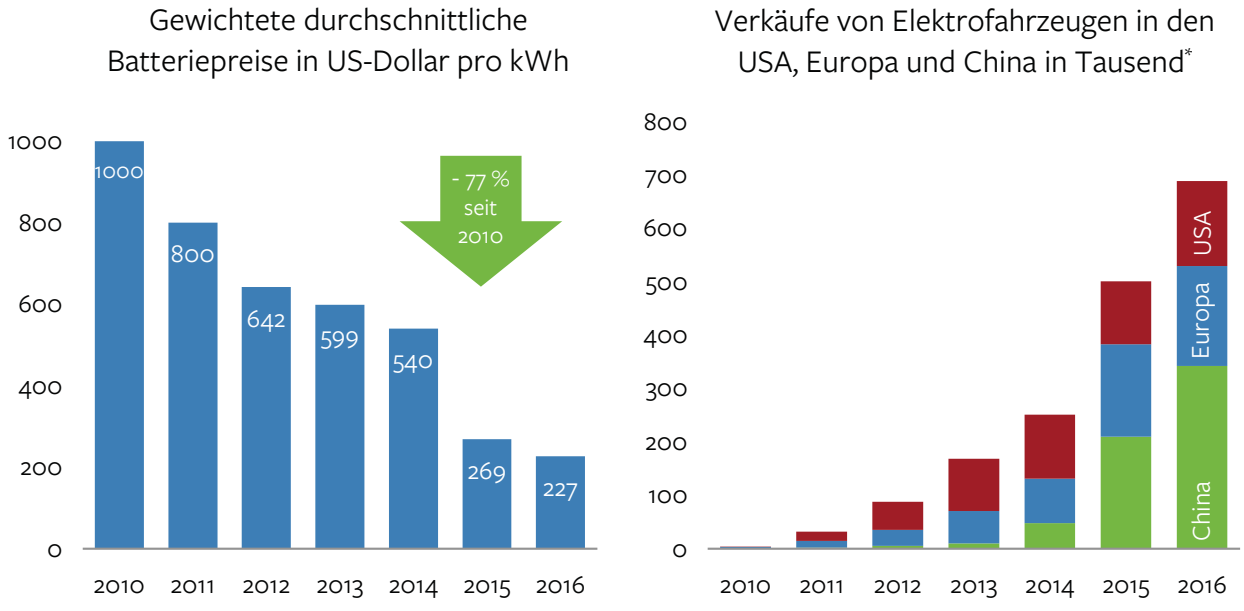
den deutschen Herstellern (RANDALL 2016). Tesla Motors ist gemessen an der Marktkapitalisierung inzwischen wertvoller als BMW und ähnlich wertvoll wie Ford und General Motors (The Guardian 10.04.2017). Dies verdeutlicht, dass auch Investoren inzwischen zunehmend von der bevorstehenden Mobilitätswende hin zur Elektromobilität überzeugt sind und Verbrennungsmotoren zunehmend als Auslaufmodel wahrgenommen werden. Die deutschen Hersteller unternehmen inzwischen erste Schritte, dem Vorbild internationaler Vorreiter zu folgen, was den sich anbahnenden Strukturwandel der Branche unterstreicht. So hat beispielsweise VW angekündigt, dass bis 2030 die gesamte Modellpalette auch elektrisch verfügbar sein soll (Volkswagen AG 2017). BMW hat angekündigt, bis 2025 mindestens zwölf elektrische Modelle auf den Markt zu bringen. Diese Ankündigungen bleiben jedoch deutlich hinter strategischen Neuausrichtungen, wie die der Volvo Car Corporation, zurück. Das Unternehmen hat angekündigt, keine neuen Dieselaggregate mehr zu entwickeln und ab 2019 keine Fahrzeuge mehr auf den Markt zu bringen, die ausschließlich mit Verbrennungsmotoren ausgestattet sind.

180. Auch ohne die notwendige Dekarbonisierung des Verkehrssektors in Deutschland ist daher eine zeitnahe Transformation der Automobilindustrie zu erwarten. Die Ankündigungen über ein mittelfristiges Neuzulassungsverbot von Kfz mit Verbrennungsmotoren in Frankreich und dem Vereinigten Königreich unterstreicht diese Entwicklung. Als Beispiel für die Folgen einer rapiden sektoralen Transformation und der Auswirkungen auf etablierte Unternehmen kann die Energiewende dienen: Auch die Stromerzeugung war als sozio-technisches System über die letzten hundert Jahre von großer Stabilität gekennzeichnet. Wenige Stromkonzerne produzierten in fossilen Großkraftwerken zentral den benötigten Strom. Auch sie unterschätzten zunächst die Auswirkungen der erneuerbaren Energien auf ihr Geschäftsmodell und überließen damit anderen kleinen Akteuren den Markt für erneuerbare Energien in Deutschland. Daraufhin waren sie in kurzer Zeit mit einem Ende ihres bisherigen Geschäftsmodells und der Notwendigkeit einer radikalen Neuausrichtung konfrontiert (BRUNEKREEFT et al. 2016, S. 254).

Entscheidend für die Automobilindustrie ist daher die Frage, ob es ihr gelingt, einen Großteil der zukünftigen Wertschöpfungskette wie die Batteriezellproduktion in Deutschland anzusiedeln und bestehende Produktionsprozesse, die für die zukünftige Elektromobilität rele-

Abbildung 4-21

Rückgang der Batteriepreise und Wachstum bei batterieelektrischen Fahrzeugen



*Batterieelektrische Fahrzeuge und Plug-In-Hybride. Verkaufszahlen für Europa beinhalten Dänemark, Deutschland, Frankreich, Irland, die Niederlande, Norwegen, Portugal, Spanien und das Vereinigte Königreich.

Quelle: McKinsey & Company 2017, S. 10, angepasst

Vorabfassung - wird durch die endgültige Fassung ersetzt.

vant sind, zu erhalten (WIETSCHEL et al. 2017b). Die Arbeitsplatzauswirkungen dieses Strukturwandels hängen daher von vielen Variablen ab. Es ist davon auszugehen, dass die zukünftige Beschäftigung in und außerhalb der Automobilproduktion andere Qualifikationsprofile als heute erfordert. Daher sollte der Strukturwandel proaktiv gestaltet und innovative Geschäftsmodelle unterstützt werden. Gelingt es, die notwendige Wende zur Elektromobilität als industriepolitische Chance zu gestalten und zu nutzen, sind insgesamt sogar positive Beschäftigungseffekte zu erwarten (ebd., S. 245).

Mobilität im Wertewandel

181. Auch in Deutschland gibt es erste Anzeichen für neue Mobilitätsmuster, die für ein grundsätzliches Aufbrechen der sozio-technischen Dominanz des motorisierten Individualverkehrs sprechen. Galt die kulturelle Vorherrschaft des Verkehrsmittels Auto in Deutschland lange Zeit als unangefochten, so zeigen sich insbesondere unter jungen Menschen erste Anzeichen einer Abkehr vom Dogma des MIV. So ging der Anteil der 17- bis 21-jährigen Erwachsenen, die einen Führerschein erwarben, in Baden-Württemberg zwischen 2001 und 2015 um fast 32 % zurück (GASTEL 2016). Angetrieben wird dieser nicht nur in Deutschland sichtbare Trend vor allem durch veränderte Mobilitätsgewohnheiten von jungen Menschen in Städten, die in ihrem Alltag häufig auf die Nutzung eines Autos verzichten (ifmo 2013). Während im Jahr 1995 deutschlandweit noch 85 % der 18- bis 35-Jährigen sowohl über einen Führerschein als auch ein Kfz im Haushalt verfügten (ZUMKELLER et al. 2004), fiel diese Zahl bis 2015 auf 68,6 % (WEIß et al. 2016). Auch die Bereitschaft zur Nutzung neuer Mobilitätsangebote ist unter jungen Menschen stärker ausgeprägt: So sind 23 % der 16- bis 24-Jährigen der Meinung, dass ein geteiltes Auto genauso gut wie ein Auto im eigenen Besitz ist, während der Anteil in der Gesamtbevölkerung um 6 % niedriger liegt (SCHOLL et al. 2017, S. 12). Dies ist insbesondere in Hinsicht auf die Chancen der Digitalisierung und der Shared Mobility, also der gemeinsamen Nutzung von Fahrzeugen, von Bedeutung (s. Tz. 201 ff.). Sollte es jedoch nicht gelingen, entsprechende attraktive und bezahlbare Mobilitätsangebote und entsprechende Infrastrukturen insbesondere für junge Erwachsene zu entwickeln, ist zu befürchten, dass diese mit zunehmendem Alter und bei ihrer Familiengründung die Kfz-Anschaffung nachholen und die Chance für den Mobilitätswandel nicht genutzt wird.

Parallel setzen sich jedoch auch in der Gesamtbevölkerung zunehmend differenziertere Einstellungen zum Kfz durch. So wünschen sich in einer repräsentativen Umfrage 79 % aller Befragten die Entwicklung des eigenen Wohnortes hin zu mehr Fußgänger-, Fahrrad- und ÖPNV-Freundlichkeit, um die Abhängigkeit vom Automobil zu senken. 91 % aller Befragten sahen dies als einen Beitrag zum guten Leben (BMUB und UBA 2017, S. 65). In Berlin stieß der Antrag zur Einleitung eines Volksbegehrens zur Förderung des Radverkehrs im Jahr 2016 auf breite gesellschaftliche Unterstützung und mündete in die Ausarbeitung eines entsprechenden Mobilitätsgesetzes durch die Landesregierung. Die gesellschaftliche Debatte über die Mobilität der Zukunft wird sich weiter intensivieren und zunehmend auch aus gesundheits- und umweltpolitischen Gesichtspunkten geführt werden. Die geänderten Mobilitätsbedürfnisse und den Wertewandel der Bevölkerung sollte die Politik daher als Chance nutzen, eine Verkehrswende herbeizuführen, die zugleich dem Klimaschutz dient.

Die Stabilität des bisherigen sozio-technischen Verkehrssystems steht aber auch mit dem internationalen Übergang von Nischentechnologien wie batterieelektrischen Fahrzeugen in Massenfertigung infrage. Schon heute ziehen 44 % aller Deutschen den Erwerb eines batterieelektrischen oder Hybridfahrzeuges in Betracht (McKinsey & Company 2017, S. 9). Noch offen und abhängig von der politischen Rahmensetzung ist jedoch, ob die Dominanz des zukünftig dekarbonisierten Individualverkehrs in der industrialisierten Welt anhalten wird oder mit der zunehmenden Durchsetzung alternativer Antriebe auch multimodale und sharingorientierte Ansätze an Bedeutung gewinnen werden (s. Tz. 201 ff.).

Zusammenfassung

182. Deutschland ist im Verkehrsbereich bisher kein Vertreter einer vorwärtsgewandten Strukturpolitik. Der Abgasskandal und der politische Umgang mit selbigem unterstreicht diese Tatsache. Ohne eine ambitionierte Vorreiterpolitik riskiert das Land mittelfristig jedoch die Wettbewerbsfähigkeit der deutschen Automobilhersteller und der damit verbundenen Lieferketten, die sich zunehmend an die veränderten globalen Rahmenbedingungen neuer Leitmärkte wie Chinas anpassen müssen.

Die notwendige Dekarbonisierung des Verkehrs und die damit verbundene Transformation des existierenden sozio-technischen Systems sollte daher als ökonomische Chance für eine innovative und wettbewerbsfähige Mobilitätsbranche in Deutschland begriffen werden. Deutschland hat insgesamt hervorragende Voraussetzungen für eine Vorreiterpolitik (SRU 2016a). Eine langfristig orientierte, ambitionierte und verzahnte Umwelt- und

Vorabfassung - wird durch die endgültige Fassung ersetzt.

Verkehrspolitik wird damit auch zur zentralen Bedingung der zukünftigen Wettbewerbsfähigkeit des Wirtschaftsstandorts Deutschland.

4.5 Auswirkungen der Digitalisierung

183. Der zunehmende Einsatz von Informations- und Kommunikationstechnologien (IKT) in Wirtschaft und Gesellschaft hat in vielen Fällen transformativen Charakter. Im Verkehrssektor und im Mobilitätsverhalten zeichnen sich die Auswirkungen der digitalen Transformation bereits ab. Es ist davon auszugehen, dass sich die Geschwindigkeit der Digitalisierung im Verkehr noch verstärkt. Von geänderten Mobilitätsverhalten in der Arbeitswelt über neue intermodale Mobilitätsangebote, bis hin zum autonomen Fahren: Um ökologische Potenziale der Digitalisierung zu nutzen und unerwünschte Effekte zu vermeiden, ist eine gestaltende Umwelt- und Verkehrspolitik erforderlich.

Bereits aus der Digitalisierung der Arbeitswelt ergeben sich auch Folgewirkungen für das Mobilitätsverhalten der Bevölkerung und die damit verbundene Verkehrsleistung. Ökologisch positiv zu werten sind dabei die Auswirkungen der Virtualisierung von Mensch-zu-Mensch-Interaktionen wie Telemedizin oder Telearbeit („Home Office") (RAMMLER 2016, S. 64 ff.). Der Anteil der Arbeitnehmerinnen und Arbeitnehmer, die gelegentlich oder überwiegend von zu Hause arbeiten, stagniert dabei in Deutschland jedoch seit Jahren bei rund 8 % unter dem EU-Durchschnitt, obwohl die Telearbeit bei 42 % der Arbeitnehmerinnen und Arbeitnehmer denkbar wäre und eine Mehrheit dieser sich diese Möglichkeit wünscht (BRENKE 2016). Zunehmende Verbreitung finden gerade im geschäftlichen Kontext auch Videokonferenzsysteme („Telepresence"), die Geschäftsreisen für Besprechungen und Meetings substituieren und in mehr als 40 % aller deutschen Unternehmen genutzt werden (RAMMLER 2016, S. 68). Differenzierter zu betrachten sind die Auswirkungen des Internethandels auf das Güterverkehrsvolumen. Zwar hat der Kauf von Produkten im Internet häufig eine bessere Ökobilanz als eine vergleichbare Anschaffung im Einzelhandel. Der konkrete Vergleich ist jedoch stark abhängig von der Art des Produkts, der Verkehrsmittelwahl und der Entfernung der Konsumentin oder des Konsumenten vom Ladengeschäft (DCTI 2015) sowie möglicher Rebound-Effekte durch zusätzlich induzierten Konsum und zunehmende Retouren im Onlinehandel.

184. Durch IKT und die dadurch ermöglichte Vernetzung von Fahrzeugen, Anbietern und Verbrauchern ermöglicht die Digitalisierung eine Entwicklung neuer, häufig intermodaler Mobilitätsangebote (LENZ und FRAEDRICH 2015, S. 177). Bereits seit einigen Jahrzehnten ist in Deutschland das stationäre Carsharing verbreitet. Seit 2009 wird dieses Angebot insbesondere in den urbanen Zentren zunehmend durch neue, stationslose Carsharing-Angebote („free floating") ergänzt. Technische Grundlage dieses Angebots ist die Vernetzung der Fahrzeuge sowie die zunehmende Verbreitung von Smartphones mit entsprechenden Ortungsfunktionen und Anwendungen, welche eine flexible Buchung der Fahrzeugflotte ermöglichen. Daneben treten neuerdings auch Plattformen, die den Fahrzeugverleih zwischen Privatpersonen ermöglichen („Peer-to-Peer Carsharing").

Von ökologischer Bedeutung ist die Frage, ob die Carsharing-Angebote zu einer Nicht-Anschaffung bzw. Abschaffung von privaten Pkw und einem Rückgang der Beförderungsleistung führen. Negative Folgen wären zu erwarten, wenn die Bequemlichkeit des Angebots zusätzliche Nachfrage induziert und sich der Modal Split zu Ungunsten des Umweltverbundes verschiebt. Die bisherigen Forschungsergebnisse zeigen dabei ein differenziertes, aber insgesamt positives Bild, was Auslastung, Flächenverbrauch und Straßenverkehrsaufkommen durch flexibles Carsharing angeht (GIESEL und NOBIS 2016; BMW AG 2016, S. 247 ff.). Um das ökologische Potenzial der Angebote zu heben, gilt es daher sicherzustellen, dass sich Fahrradleihsysteme, ÖPNV- und Carsharing-Angebote ergänzen und über entsprechende mobile Anwendungen intermodal vernetzt werden („Connected Mobility"). So kann von der Verbindungssuche über den Ticketkauf bis zur Autoreservierung die gesamte multimodale Mobilitätskette jederzeit spontan und komfortabel gebucht und abgerechnet werden (RAMMLER 2016, S. 52). In der Folge verschwimmen die Grenzen zwischen ÖPNV- und Individualverkehr.

4.5.1 Entwicklung des autonomen Fahrens

185. Die deutlichsten Auswirkungen der Digitalisierung auf die Mobilität sind jedoch durch die Fortschritte der Automatisierung und Vernetzung in Form von autonomen Fahrzeugen absehbar. Mit der Einführung autonomer Fahrzeuge ist im Allgemeinen die Erwartung einer grundlegenden Transformation des existierenden Straßenverkehrs und der damit zusammenhängenden Mobilitätsmuster verbunden. In der aktuellen Debatte um das

Vorabfassung - wird durch die endgültige Fassung ersetzt.

autonome Fahren stellen sich vielfältige rechtliche, technische, ethische, datenschutzrechtliche und Akzeptanzfragen, die an dieser Stelle nicht diskutiert werden. Wenig Beachtung finden in der aktuellen öffentlichen Debatte zumeist ökologische Folgewirkungen, die in den folgenden Abschnitten in den Mittelpunkt gestellt werden sollen, da davon auszugehen ist, dass autonomes Fahren und selbstfahrende Autos im Besonderen erhebliche Auswirkungen auf den spezifischen Energiebedarf der Fahrzeuge und die Beförderungsleistung haben werden. Fortfolgend soll ein Überblick über die technologische Entwicklung und mögliche Marktreife des autonomen Fahrens sowie eine Zusammenfassung über den Forschungsstand zu den ökologischen Folgen gegeben werden.

186. Derzeit ist ein globaler Innovationswettbewerb um die Marktreife von selbstfahrenden Autos zu beobachten. Marktbeobachter erwarten die Entwicklung eines Wirtschaftszweiges von neuen Mobilitätsangeboten rund um autonomes Fahren mit einem jährlichen Umsatz von 7 Billionen USD bis zum Jahr 2050 (LANCTOT 2017). Im globalen Wettbewerb um die Entwicklung entsprechender Fahrzeuge scheint die deutsche Automobilindustrie prinzipiell gut gerüstet, da etwa 60 % der weltweit angemeldeten Patente auf deutsche Unternehmen entfallen (BARDT 2016, S. 778). Unklar ist jedoch, ob dieser Vorteil im Wettbewerb mit Unternehmen mit datenbasierten Geschäftsmodellen und einer radikaleren, disruptiveren Innovationskultur ausreichen wird.

187. Grundsätzlich lassen sich verschiedene Automatisierungsgrade in Fahrzeugen unterscheiden, die mit einfachen Assistenzsystemen beginnen und bis zum komplett fahrerlosen Fahrzeug reichen. Die Unterteilung orientierte sich in der öffentlichen Debatte anfangs in der Regel an einer vierstufigen Systematik, wie sie von der US-Verkehrssicherheitsbehörde NHTSA (National Highway Transportation Safety Agency) eingeführt wurde (NHTSA 2013). Seit 2015 hat sich zunehmend die auch in diesem Gutachten verwendete fünfstufige Systematik der SAE International durchgesetzt (s. Tab. 4-10; SAE International – ORAD 2016).

Seit vielen Jahren verbreitet sind Fahrzeuge, die entweder über Geschwindigkeitsregelanlagen (Längsführung)

Tabelle 4-10

Automatisierungsgrade von autonomen Fahrzeugen

Grad der Automatisierung	0 Keine Automatisierung („driver only“)	1 Assistiert	2 Teilautomatisiert	3 Hochautomatisiert	4 Vollautomatisiert	5 Fahrerlos
Funktion	Längs- und Querführung durch die fahrzeugführende Person	Längs- oder Querführung automatisiert	Längs- und Querführung automatisiert	Längs- und Querführung automatisiert	Längs- und Querführung automatisiert	Längs- und Querführung automatisiert
Überwachung der Fahrumgebung	Durch die fahrzeugführende Person	Durch die fahrzeugführende Person	Durch die fahrzeugführende Person, die das Fahrzeug jederzeit übernehmen können muss	Durch das Fahrzeug, Zeitreserve zur Übernahme der Kontrolle durch die fahrzeugführende Person	In abgegrenzten Anwendungsfällen keine Überwachung notwendig	Keine Überwachung notwendig

SRU 2017; Datenquelle: SAE International – ORAD 2016

Vorabfassung - wird durch die endgültige Fassung ersetzt.

oder Spurassistenten (Querführung) verfügen. Diese Fahrzeuge sind dem Automatisierungsgrad 1 zuzurechnen. In den letzten Jahren erreichen vermehrt Fahrzeuge mit dem Teilautomatisierungsgrad 2 den Markt, die unter anderem Abstandsregeltempomaten mit Spurhalteassistenten und weiteren Assistenzfunktionen kombinieren (Längs- und Querführung). Allerdings entlasten diese Systeme die Fahrerinnen und Fahrer nicht von ihrer Verantwortung zur permanenten Überwachung des Fahrzeugs. Auf der hochautomatisierten Stufe 3 erkennt das Fahrzeug selbstständig, wann das Automatisierungssystem an seine Grenzen gerät und der Mensch das Steuer mit nur kurzer Zeitverzögerung wieder übernehmen muss. Innerhalb dieser gesetzten Grenzen kann das Auto jedoch selbstständig fahren und erfordert keine permanente Kontrolle durch die Fahrenden. Auf der Automatisierungsstufe 4 ist in abgegrenzten Anwendungsfällen gar keine menschliche Überwachung mehr notwendig. Es ist zu erwarten, dass die Automatisierung zuerst für weniger komplexe Anwendungsfälle wie Autobahnfahrten oder Parkplatzsuchen in abgegrenzten Bereichen (Valet-Parking) erreicht wird (VDA 2015, S. 15). Mit der Automatisierungsstufe 5 wird das fahrerlose Fahren unter allen Bedingungen und in allen Fahrsituationen ermöglicht.

188. Derzeit existiert eine Vielzahl von sehr unterschiedlichen Prognosen von Marktbeobachtern bezüglich der Marktreife von autonomen Fahrzeugen der Stufen 3, 4 und 5. Verschiedene Autohersteller haben die technische Verfügbarkeit von Fahrzeugen der Automatisierungsstufe 4 für 2018 bis 2020 angekündigt (LIEBREICH 2017, S. 58; ALEXANDER-KEARNS und CASSADY 2016, S. 7), allerdings werden diese Prognosen von anderen Marktbeobachtern als übermäßig optimistisch angesehen. Der Verband der Automobilindustrie erwartet die Verfügbarkeit der Automatisierungsstufe 3 für hochautomatisiertes Fahren auf der Autobahn um das Jahr 2020 und des vollautomatisierten Fahrens (Stufe 4) in Städten um 2030 (VDA 2015, S. 15). Es ist davon auszugehen, dass einige Zeit zwischen dem vollautomatisierten Fahren in abgegrenzten Anwendungsfällen (Stufe 4) bis zur Freigabe der autonomen Fahrzeuge unter allen Bedingungen (Stufe 5) vergehen wird, da hier auch die komplexesten Fahrsituationen, wie Mischverkehre in Städten und unbefestigte Straßen, berücksichtigt werden müssten.

Bis Mai 2017 hatte die mit der Entwicklung autonomer Fahrzeuge beschäftigte Alphabet-Tochter Waymo bereits rund 5 Mio. km Fahrerfahrung im praktischen Straßenverkehr der USA gesammelt. Im Jahr 2016 war dabei nur ein menschlicher Eingriff pro 8.250 gefahrene km notwendig. Dies bedeutet einen Rückgang um 75 % im Vergleich zum Vorjahr (State of California, Department of Motor Vehicles 2017). Unter der Annahme einer vergleichbaren Rate im deutschen Alltagsverkehr wären damit bei einer durchschnittlichen Pkw-Fahrleistung weniger als zwei manuelle Eingriffe pro Jahr notwendig. Wird angenommen, dass jeder zweite notwendig gewordene menschliche Eingriff bei den autonomen Fahrzeugen sonst zu einem Unfall geführt hätte, ist die Fahrsicherheit menschlicher Fahrerinnen und Fahrer derzeit noch um einen Faktor Zwanzig besser als die der besten verfügbaren autonomen Fahrzeuge. Es ist jedoch davon auszugehen, dass sich das Verhältnis in einigen Jahren umkehren wird.

Unabhängig vom konkreten Jahr der technischen Marktreife wird es aufgrund anfänglicher Preisaufschläge für entsprechende Fahrzeugmodelle und der notwendigen sozialen Akzeptanz vermutlich einige Jahre dauern, bis eine relevante Anzahl autonomer Fahrzeuge auf den Straßen vorhanden ist. Die Kosten für die notwendigen Sensoren sind in den letzten Jahren jedoch bereits rapide gefallen. Während die für autonome Fahrzeuge häufig eingesetzte Lidar-Sensorik 2009 noch rund 75.000 USD kostete und damit für den Massenmarkt untauglich war, sind die Kosten innerhalb weniger Jahre bereits über 90 % gefallen und ein Einsatz für Fahrzeuge im Premiumsegment damit bereits denkbar. Weitere Kostensenkungen werden durch Skaleneffekte in der Produktion erwartet (KUCHINSKAS 2017). Es scheint damit denkbar, dass autonome Fahrzeuge in den 2040er-Jahren allgemein verfügbar und unter Umständen sogar die vorherrschende Form der automobilen Fortbewegung darstellen werden. Es bleibt jedoch festzuhalten, dass solche Prognosen mit einem hohen Maß an Unsicherheit verbunden sind.

4.5.2 Auswirkungen auf das Ziel der Dekarbonisierung des Verkehrs

189. Aufgrund der erwarteten transformativen Wirkung des autonomen Fahrens auf das Verkehrssystem ist es sinnvoll, sich bereits heute mit den möglichen klima- und umweltrelevanten Folgewirkungen zu beschäftigen. Ob das autonome Fahren eine Dekarbonisierung des Verkehrs erleichtert oder erschwert, hängt dabei von einer Reihe von Bedingungen ab. Für die Umweltpolitik ist es daher von großer Bedeutung, die möglichen Folgen des autonomen Fahrens zu antizipieren, unerwünschte Folgen zu verhindern und das transformative Potenzial zu

Vorabfassung - wird durch die endgültige Fassung ersetzt.

fördern. Im Folgenden werden die energetischen und umweltrelevanten Effekte qualitativ dargestellt. Eine genaue Quantifizierung der Effekte ist aufgrund von Unsicherheiten zum jetzigen Zeitpunkt nur schwer möglich.

Effekte auf Fahrzeugebene

190. Betrachtet man zunächst die Effekte der Automatisierung auf der Ebene der Fahrzeuge selbst, wird im Allgemeinen mit einer Verbesserung der Effizienz gerechnet. Dies ist auf eine Reihe von verschiedenen Einzeleffekten zurückzuführen.

191. Zum einen kann der effizientere und vorausschauendere Fahrstil autonomer Fahrzeuge unnötige Brems- und Beschleunigungsmanöver vermeiden (BROWN et al. 2014, S. 140 ff.). Diese Effekte spielen insbesondere im Stadtverkehr eine Rolle, wo eine Kommunikation vernetzter Fahrzeuge untereinander (V2V-Kommunikation) sowie mit den Steuerungsanlagen (V2I-Kommunikation) die antizipative Fahrweise der autonomen Fahrzeuge weiter verstärken kann. Als obere Grenze der möglichen Energieeinsparungen werden in der Regel rund 20 bis 25 % des Verbrauches angesehen (zu den positiven verkehrlichen Folgen s. Tz. 195 ff.). Da autonome Fahrzeuge selbstständig die schnellste Route auswählen und Staus vermieden werden, ist auf Fahrzeugebene ein zusätzlicher, aber relativ geringer Verbrauchsrückgang zu erwarten.

192. Mit der fortschreitenden Vernetzung autonomer Fahrzeuge untereinander ist zudem zu erwarten, dass diese in geringem Abstand hintereinander fahren können, was den Luftwiderstand der Fahrzeugkolonne verringert (Platooning). Da der Schwerpunkteinsatz dieser Technologie bei Überland- und Autobahnfahrten gesehen wird, ist insbesondere der Einsatz im Straßengüterverkehr von Interesse. Platooning verspricht dabei einen möglichen Rückgang des Energieverbrauchs um 5 bis 20 % (WADUD et al. 2016, S. 12; BROWN et al. 2014, S. 140).

193. Von großer Bedeutung sind bei weitgehender Marktdurchdringung autonomer Fahrzeuge die Folgen der verbesserten Kollisionsvermeidung und weit geringeren Unfallwahrscheinlichkeiten: Die verstärkte aktive Sicherheit der Fahrzeuge bietet die Möglichkeit auf passive Sicherheitsausstattungen wie Knautschzonen zu verzichten und damit verstärkt auf Leichtbauweisen zurückzugreifen, was die Fahrzeuge deutlich leichter und damit effizienter machen würde (WADUD et al. 2016, S. 7). Das Potenzial dieser Möglichkeiten wird jedoch erst genutzt werden können, sobald autonome Fahrzeuge mit V2V-Systemen dominieren, sodass Unfälle mit menschlich geführten Fahrzeugen so gut wie ausgeschlossen sind.

194. Abschließend ist darauf hinzuweisen, dass autonome Fahrzeuge helfen können, heute noch vorhandene Nachteile batterieelektrischer Fahrzeuge zu kompensieren und diesen damit zum Durchbruch zu verhelfen. Durch die insgesamt deutlich höhere Fahrzeugeffizienz und das wie beschrieben potenziell geringere Gewicht erhöht sich einerseits die Reichweite der Fahrzeuge bzw. lassen sich Fahrzeuge mit gleichbleibender Reichweite mit kleineren Batterien ausstatten und dadurch günstiger herstellen (ANDERSON et al. 2016b, S. 33 ff.). Weiterhin ergeben sich neue Möglichkeiten zum selbstständigen Aufladen des Fahrzeugs nach der Nutzung, was den Aufwand für die Benutzerinnen und Benutzer sowie deren „Reichweitenangst“ deutlich senken dürfte.

Verkehrliche und gesellschaftliche Wirkung autonomer Fahrzeuge

195. Während die Folgen der Automatisierung auf Fahrzeugebene primär technischer Natur sind, gestalten sich Vorhersagen auf verkehrlicher Ebene deutlich komplexer und sind daher von größerer Unsicherheit gekennzeichnet.

196. Durch die erwähnte vorausschauende Fahrweise und das Platooning autonomer Fahrzeuge wird eine Steigerung der Kapazität von Verkehrsanlagen vorausgesehen. So können durch autonome Fahrzeuge mit V2V-Kommunikation Sicherheitsabstände zwischen diesen Fahrzeugen verringert werden. In einem rein autonomen System ist ein Kapazitätszugewinn bei hohen Geschwindigkeiten von bis zu 80 % denkbar, während der Zugewinn bei niedrigeren Geschwindigkeiten und in Städten niedriger ausfällt (FRIEDRICH 2015). Die Effekte in einem Mischsystem aus autonomen und Fahrzeugen mit menschlichen Fahrerinnen und Fahrern sind schwieriger zu simulieren, insgesamt wird jedoch auch hier ein positiver Effekt für Kapazität und Verkehrsfluss vorhergesehen (FRIEDRICH 2015; HUSSAIN et al. 2016; TALEBPOUR und MAHMASSANI 2016). Da durch den Sicherheitszugewinn autonomer Fahrzeuge zukünftig Unfälle von vornherein vermieden werden könnten, ist auch ein Rückgang unfallbedingter Staus zu erwarten (ANDERSON et al. 2016b, S. 23).

197. V2V- und V2I-Kommunikation reduzieren das Unfallrisiko bei hohen Geschwindigkeiten deutlich, da menschliche Reaktionszeiten und Fehlerquellen ausgeschlossen sind. Damit ist denkbar, dass eine Mehrzahl der autonomen Fahrzeuge von den Nutzenden auf

Vorabfassung - wird durch die endgültige Fassung ersetzt.

Streckenabschnitten ohne zulässige Höchstgeschwindigkeit schneller als bisher betrieben werden (WADUD et al. 2016, S. 6). Da mit steigender Geschwindigkeit der Luftwiderstand quadratisch ansteigt, wird die Energieintensität deutlich erhöht. Wie in Kapitel 5.7 beschrieben, kann dies in Konsequenz indirekt zu einem weiteren Anstieg der Beförderungsleistung führen.

198. Bisher setzt das Betreiben eines Pkw das Vorhandensein eines Führerscheins voraus. Es ist davon auszugehen, dass fahrerlose Fahrzeuge der Automatisierungsstufe 5 zusätzliche Nachfrage bei Nutzergruppen induzieren, die bisher nicht von Pkw Gebrauch machen. Dazu gehören mobilitätseingeschränkte Menschen, aber auch Jugendliche und Kinder. Zunächst ist der dadurch ermöglichte Zugewinn an Mobilität und gesellschaftlicher Partizipation positiv zu werten. Dennoch sind negative ökologische Auswirkungen zu erwarten: In einer Untersuchung für die USA wurde geschätzt, dass die absolute Verkehrsleistung durch die zusätzliche Nachfrage neuer Nutzergruppen um ungefähr 40 % ansteigen könnte (BROWN et al. 2014, S. 142 ff.).

199. Derzeit wird davon ausgegangen, dass autonome Fahrzeuge die Kosten-Nutzen-Bilanz von Pkw deutlich verbessern und damit zusätzliche Nachfrage induzieren. Aufgrund der genannten Effizienzgewinne der Fahrzeuge ist zunächst mit niedrigeren Kraftstoffkosten zu rechnen. Zudem ist bei sinkender Unfallgefahr auch von einem Rückgang der Versicherungskosten auszugehen (ANDERSON et al. 2016b, S. 18 ff.). Sollten selbstfahrende Autos sich zukünftig eigenständig einparken und auch in einiger Distanz von den Nutzenden parken können, ist auch mit einem Rückgang der Parkgebühren zu rechnen. Die niedrigen Betriebskosten könnten dabei allerdings auch zu unnötigen Leerfahrten führen, wenn Fahrzeuge in großer Distanz geparkt werden oder im Zweifel die Parkplatzsuche und -kosten durch ein permanent fahrendes Fahrzeug ganz vermieden werden können. Insgesamt ermöglichen autonome Fahrzeuge damit deutlich niedrigere Betriebskosten bei anfangs höheren Anschaffungskosten.

Den größten Effekt auf die Verkehrsnachfrage könnten jedoch die veränderten Opportunitätskosten des Autofahrens haben: Statt wie bisher hinter dem Steuer zu sitzen, könnte die Fahrzeit zum Arbeiten, Schlafen oder für Freizeitaktivitäten genutzt werden. Damit wäre die Fahrzeit keine „verlorene“ Zeit mehr, was die Kosten-Nutzen-Bilanz des Fahrens deutlich verschieben und zusätzlichen Verkehr induzieren könnte. Der durch die autonomen Fahrzeuge weiter verbesserte Verkehrsfluss könnte dabei nicht nur für die Nutzenden der selbstfahrenden Fahrzeuge einen zusätzlichen Anreiz zum Zurücklegen weiterer Distanzen bieten (BARCHAM 2014, S. 17). Dies könnte sich auf die Flächennutzung auswirken: Wenn die relativen Fahrtkosten absinken, steigt die Attraktivität des Wohnens in größerer Distanz vom Arbeitsplatz. Infolgedessen könnten die Zersiedelung und der Flächenverbrauch ansteigen (ANDERSON et al. 2016b, S. 25), sofern die Entwicklung politisch nicht eingedämmt wird.

200. Zusammenfassend kann festgehalten werden, dass heute noch ein hohes Maß an Unsicherheit bezüglich der spezifischen Effekte des autonomen Fahrens auf die Ziele der Dekarbonisierung besteht. Bedingt ist dies durch die Vielzahl an Variablen und Bedingungen, an die Vorhersagen geknüpft sind. Grundsätzliche Einigkeit besteht darüber, dass die Energieeffizienz der autonomen Fahrzeuge im Vergleich zu heutigen Fahrzeugen steigt. Andererseits kann auch davon ausgegangen werden, dass die Beförderungsleistung durch das autonome Fahren ansteigen wird. Unsicher ist jedoch, ob diese Rebound-Effekte der zunehmenden Nutzungsintensität überwiegen oder die höhere Energieeffizienz dennoch zu einem Rückgang des Gesamtenergieverbrauchs führen wird (Tab. 4-11).

4.5.3 Notwendigkeit integrierter Mobilitätskonzepte

201. Ob letztlich die positiven oder negativen Folgen des autonomen Fahrens auf die Umweltziele überwiegen, hängt von dem Willen zur politischen Rahmensetzung des bisher marktgetriebenen Transformationsprozesses ab (FOLJANTY und DUONG 2016, S. 46). Nimmt man die Chancen und Risiken ernst, so bedarf es insbesondere der politisch gestützten Einbettung des autonomen Fahrens in integrierte und für die jeweiligen Regionen passende Mobilitätskonzepte. Das autonome Fahren sollte dabei im Kontext einer Transformation der individuellen Mobilität verstanden werden (FRAEDRICH et al. 2015, S. 7 ff.). Dabei gilt es insbesondere, autonome Fahrzeuge als Baustein eines modernen ÖPNV-Angebots zu begreifen und die Chancen der Digitalisierung für Inter- und Multimodalität sowie Shared Mobility und hier insbesondere Ridesharing zu nutzen.

202. Eine Fortentwicklung des existierenden Straßenverkehrs zur Autonomie der Fahrzeuge unter Beibehaltung einer Kultur des persönlichen Autobesitzes ist aller Voraussicht nach mit einem ökologisch unerwünschten

Vorabfassung - wird durch die endgültige Fassung ersetzt.

Vorabfassung - wird durch die endgültige Fassung ersetzt.

Tabelle 4-11

Ökologische Auswirkungen von autonomen Fahrzeugen auf den Energieverbrauch

		Energieintensität	Beförderungsleistung
Fahrzeugebene	Effizientere Fahrweise	↓	→
	Platooning	↓	→
	Aktive Sicherheit & Leichtbau-Optimierung	↓	→
	Rückkopplungen auf Elektrifizierung	↓	→
Verkehrliche Wirkung	Verbesserter Verkehrsfluss	↓	→
	Höhere Fahrtgeschwindigkeiten	↑	↑
	Neue Nutzergruppen	→	↑
	Veränderte Kosten-Nutzen-Bilanz	→	↑

SRU 2017

Wachstum der Pkm, einer verringerten Attraktivität des Umweltverbundes, einer Zunahme von Staus trotz erhöhter Straßenkapazität und einem entsprechend hohen Energie- und Flächenverbrauch verbunden (Tab. 4-11). Durch die Möglichkeiten der Digitalisierung und der Nutzung entsprechender mobiler Endgeräte (s. Tz. 184) ist jedoch auch eine Zukunft denkbar, in dem das stationslose Carsharing vor allem aus autonomen Fahrzeugen besteht, welche die Nutzenden vom gewünschten Standort abholen und sie am gewünschten Zielort wieder absetzen (Door-to-door). Dabei ist es möglich, dass die Fahrzeuge nach Verwendung sofort vollautonom zu den nächsten Kundinnen und Kunden fahren. Auf diesem Weg lassen sich Parkzeiten von ungenutzten Fahrzeugen reduzieren und somit auch der Flächenverbrauch für Parkplätze verringern. Der Zugewinn an Bequemlichkeit und Geschwindigkeit führt in Kombination mit den niedrigeren Betriebskosten jedoch auch zu einer erhöhten Wettbewerbsfähigkeit der autonomen Carsharing-Flotte mit dem ÖPNV. In einem ungünstigen Szenario droht für den ÖPNV dabei eine Kostenspirale: Wenn Kundinnen und Kunden auf autonome Fahrzeuge privater Anbieter umsteigen und die Kosten des Öffentlichen Verkehrs auf immer weniger zahlende Gäste verteilt werden müssen, könnte es in Folge zu einem höheren finanziellen Unterstützungsbedarf durch die öffentliche Hand kommen oder die Ticketpreise steigen, was wiederum weitere Nutzende zum Umstieg auf die autonome Carsharing-Flotte bewegen könnte (HAZAN et al. 2016, S. 10). Dabei ist insbesondere zu befürchten, dass private Anbieter sich auf lukrative Geschäftsgebiete und Relationen konzentrieren, während die öffentliche Hand das unrentable Restangebot als Teil der Daseinsvorsorge erbringt (FOLJANTY und DUONG 2016, S. 47). Die Verlagerung von Verkehrsmengen vom ÖPNV zu autonomen Fahrzeugen würde dann gleichzeitig zu einer Zunahme der Verkehrsleistung und in der Folge zu mehr Staus als im heutigen Verkehrssystem führen (FRIEDRICH und HARTL 2016).

203. Ein positives ökologisches Potenzial durch autonome Fahrzeuge ergibt sich vor allem dann, wenn sie ge-

teilt werden und als Element des öffentlichen Verkehrs begriffen und in dessen Angebotsstruktur integriert werden (LENZ und FRAEDRICH 2015, S. 189 ff.). Geteilte autonome Fahrzeuge eröffnen neue Chancen für den ÖPNV im ländlichen Raum und auf Linien mit schon bisher niedriger Nachfrage: Statt dabei wie bisher Linien mit geringer Auslastung und Kostendeckung anzubieten, wird es möglich sein, diese durch bedarfsgerechte und flexible autonome Fahrzeuge zu ergänzen oder zu ersetzen. Weiterhin eignen sich autonome Fahrzeuge als Zubringer auf der ersten und letzten Meile einer intermodalen Mobilitätskette im Zusammenspiel mit dem öffentlichen Schienenverkehr. Dazu muss es jedoch gelingen, das Angebot des ÖPNV in Gebieten hoher Nachfrage zu erhalten oder auszubauen. Weiterhin ist es dazu notwendig, dass möglichst viele Fahrten nicht nur als serielles Carsharing, sondern als paralleles Ridesharing abgewickelt werden, bei dem sich mehrere Passagiere ein Fahrzeug auf (einem Teil) der Strecke teilen. Dadurch können der Verkehr, die Anzahl der notwendigen Fahrzeuge und die Emissionen bei gleichbleibender Mobilität verringert werden. Modellierungen zeigen, dass sich die heutigen Mobilitätsbedürfnisse in Städten bei Ridesharing in Kombination mit einem gut ausgebauten Umweltverbund mit weniger als 10 % der heutigen Fahrzeugflotte erfüllen ließen (FAGNANT und KOCKELMAN 2014; ITF 2016; FRIEDRICH und HARTL 2016). Entscheidend ist aus der Umweltperspektive jedoch, dass in Städten die Vermeidung und Verlagerung des Verkehrs auf ökologische Verkehrsträger Priorität gegenüber dem sinnvollerweise nur ergänzenden Einsatz von einer autonomen Taxiflotte genießen sollte.

4.5.4 Zwischenfazit

204. Informations- und Kommunikationstechnologien werden die Mobilität der Zukunft grundlegend verändern. Durch das autonome Fahren ist eine Abnahme des spezifischen Energieverbrauchs bei gleichzeitigem Zuwachs der Pkm zu erwarten, der die Effizienzgewinne im Zweifel überkompensiert. Die quantitativen Auswirkungen und der Zeitpunkt der Marktdurchsetzung sind derzeit noch schwer vorherzusagen. Dennoch ist politisches Handeln bereits jetzt notwendig, denn die unterschiedlichen Prognosen zeigen auch die Gestaltungsnotwendigkeit des Transformationsprozesses auf. Bleibt das Paradigma des individuellen Autobesitzes bei autonomen Fahrzeugen im Wesentlichen bestehen, ist mit zahlreichen Leerfahrten und einer starken Zunahme der Staus in den Städten bei gleichzeitigem Rückbau des ÖPNV zu rechnen. Für die Dekarbonisierung des Verkehrs vorteilhaft werden autonome Fahrzeuge nur dann sein, wenn es gelingt, neben der notwendigen Elektrifizierung und der erwarteten Automatisierung als dritten Trend die Shared Mobility zu etablieren (FULTON und MEROUX 2017). In einer solchen Revolution der persönlichen Mobilität werden Fahrzeuge primär geteilt genutzt, die Grenzen zwischen Individual- und öffentlichem Verkehr verschwimmen (FRAEDRICH et al. 2015). Für die Realisierung dieses Konzeptes bedarf es jedoch einer öffentlichen Hand, die sich selbst als Akteur auf dem Entwicklungsfeld der digitalen Mobilität begreift und einen gesetzgeberischen Rahmen setzt, der die ökologisch und sozial gewünschten Entwicklungen anreizt (s. Kap. 5.10).

Vorabfassung - wird durch die endgültige Fassung ersetzt.

Vorabfassung - wird durch die endgültige Fassung ersetzt.

5 Empfehlungen

Vorabfassung - wird durch die endgültige Fassung ersetzt.

Im Verkehrssektor ist ein zügiges und umfassendes Umsteuern erforderlich, damit auch dieser Sektor seinen Beitrag zum Klimaschutz leistet. Hierzu müssen in dieser beginnenden Legislaturperiode wichtige Weichenstellungen vorgenommen werden. Ein Leitmotiv dabei sollte sein, das Prinzip der Kostenwahrheit im Verkehrssektor umzusetzen. So ist es notwendig, die Steuern, Abgaben und Subventionen so zu reformieren, dass sie konsistent an klima-, umwelt- und gesundheitspolitischen Zielen ausgerichtet sind. Dazu zählt für den Sachverständigenrat für Umweltfragen (SRU) auch die Einführung einer streckenabhängigen Pkw-Maut. Der spezifische Energieverbrauch im Straßenverkehr sollte durch weiterentwickelte Effizienzgrenzwerte und fiskalische Anreize gesenkt werden. Die Elektromobilität sollte gezielt durch Quoten sowie den Ausbau der erforderlichen Ladeinfrastruktur gefördert werden. Um angesichts des zusätzlich steigenden Rohstoffbedarfs der Elektromobilität zukünftigen Knappheiten vorzubeugen und die mit der Primärgewinnung verbundenen Umweltauswirkungen zu verringern, müssen die Rahmenbedingungen für eine hochwertige Kreislaufführung bereits zur Markteinführung geschaffen werden. Auch der Schienen-, der Schiffs- und der Luftverkehr müssen durch gezielte Maßnahmen zum Klimaschutz beitragen.

205. Der Verkehrssektor muss transformiert werden, um die kurz- und langfristigen Klima- und Umweltziele zu erreichen. Der SRU hat Empfehlungen erarbeitet, welche die zentralen, in dieser Legislaturperiode dringend umzusetzenden Weichenstellungen im Verkehrssektor umfassen. Diese orientieren sich an einer langfristigen Perspektive, die auf eine nahezu vollständige Dekarbonisierung des Verkehrssektors bis zum Jahr 2050 ausgerichtet ist, verlieren jedoch gleichzeitig die klimapolitische Notwendigkeit einer bereits sehr schnellen Emissionsminderung nicht aus den Augen.

Ein Großteil dieser Vorschläge sollte nach Auffassung des SRU in das Klimaschutzkonzept Straßenverkehr Eingang finden, das der Klimaschutzplan 2050 vorsieht, (BMUB 2016c, S. 8). Es ist vorgesehen, dass das Klimaschutzkonzept Straßenverkehr die Emissionen und den Energieverbrauch von Pkw sowie leichten und schweren Nutzfahrzeugen adressiert. Außerdem sollen Fragen der treibhausgasfreien Energieversorgung, der dafür notwendigen Infrastruktur und der Sektorkopplung (durch Elektromobilität) thematisiert werden (ebd.).

Ein zentraler Fokus der vom SRU empfohlenen Maßnahmen liegt darauf, Anreize für die schnelle Einführung und Marktdurchdringung der Elektromobilität zu geben. Diese müssen mit dem Ausbau erneuerbarer Energien im Zuge der Energiewende einhergehen. Daneben zielen die vorgeschlagenen Maßnahmen auf eine generelle Effizienzsteigerung der Fahrzeuge und mehr Kostenwahrheit im Verkehr ab. Letzteres soll auch zur Vermeidung insbesondere der besonders emissionsintensiven Verkehre beitragen. Verkehrsvermeidung (bei gleichzeitiger Gewährleistung hoher Mobilität) und die Verlagerung auf weniger umweltschädliche Verkehrsträger sind ein unabdingbarer Bestandteil einer nachhaltigen Dekarbonisierungsstrategie und folglich Teil des nachfolgenden Empfehlungskatalogs. Der SRU beabsichtigt, sich mit dem Verkehr im städtischen Raum zu einem späteren Zeitpunkt zu beschäftigen. Wichtige Aspekte des städtischen Verkehrs sind insbesondere die Förderung des Rad- und Fußverkehrs sowie eine Siedlungs- und Raumentwicklung, die eine umweltfreundliche und gesundheitsfördernde Mobilität ermöglicht. Diese, die wichtige Ansatzpunkte für eine klima- und umweltverträgliche Umgestaltung des Verkehrs bieten, werden deshalb nachfolgend nicht vertieft. Auch wenn der Schwerpunkt des Gutachtens auf dem landgebundenen Verkehr liegt, der mit Blick auf die Emissionen dominiert, werden auch Ansatzpunkte zur Dekarbonisierung des Schiffs- und Luftverkehrs diskutiert.

5.1 Reform von Steuern, Abgaben und Subventionen

206. Das Verhalten der Akteure im Verkehrssektor wird maßgeblich von den ökonomischen Rahmenbedingungen bestimmt. Dieser Rahmen wird in einem hohen Maße von staatlichen Entscheidungen determiniert. Ihn konsistent an den klima-, umwelt- und gesundheitspolitischen Zielen auszurichten, stellt daher einen wichtigen Ansatzpunkt für eine nachhaltige Verkehrswende dar.

5.1.1 Reform von Steuern und Abgaben auf Energieverbrauch und Treibhausgasemissionen

207. Steuern und Abgaben auf den Energieverbrauch sind ein zentrales Lenkungsinstrument, das über die Internalisierung externer Kosten das Verhalten von Bürgerinnen und Bürgern sowie Unternehmen in Richtung umweltverträglicherer Entscheidungen beeinflussen soll. Gerade in der Klimapolitik kommt ihnen große Bedeutung zu. Energiesteuern und insbesondere die CO_2-Bepreisung wirken grundsätzlich auf alle Wege zur Dekarbonisierung und sind daher eine wichtige Säule im Politikmix. Die Bepreisung klimaschädlicher Emissionen reizt Vermeidung, Verlagerung, Effizienzverbesserungen und die Umstellung auf treibhausgasneutrale Energieträger an.

208. Auch mit Blick auf das Wechselspiel der verschiedenen Dekarbonisierungsansätze ist eine Belastung und (kontinuierliche) Verteuerung des Faktors Energie geboten, vor allem um die klimapolitische Effektivität von Maßnahmen zur Steigerung der Energieeffizienz zu erhalten. Mit steigender Energieeffizienz werden bei konstanten Energieträgerpreisen Verkehrsleistungen günstiger. Steigt in der Folge die Verkehrsleistung, wird von einem (direkten) Rebound-Effekt gesprochen. Hierdurch können die mit einer Energieeffizienzverbesserung zunächst einhergehenden CO_2- und Energieeinsparungen partiell oder sogar vollständig aufgezehrt werden (GILLINGHAM et al. 2016; SANTARIUS 2012; BARKER et al. 2009; SORRELL 2007; MADLENER und ALCOTT 2009; GREENING et al. 2000). Solche Rebound-Effekte können vermieden werden, wenn die Energiepreise im Einklang mit dem Energieproduktivitätsfortschritt steigen (von WEIZSÄCKER et al. 2010).

Um eine ökologische Lenkungswirkung zu erzielen und den Rebound-Effekt wirksam einzudämmen, ist es grundsätzlich unerheblich, ob das ansteigende Preissignal vom Markt ausgeht oder politisch induziert ist. Mit zuletzt stark rückläufigen Preisen gingen von den Entwicklungen an den internationalen Energiemärkten allerdings eher gegenteilige, tendenziell verbrauchssteigernde Impulse aus. Angesichts des entsprechend der Ziele des Klimaabkommens von Paris knappen verbleibenden Emissionsbudgets und der umfangreichen Vorräte an fossilen Energieträgern ist nicht zu erwarten, dass die notwendigen Energiepreissignale vom Markt ausgehen werden (SRU 2016a, Tz. 189 ff.; 2015a, These 1). Es ist somit erforderlich, dass der Staat verstärkt eine steuernde Rolle einnimmt.

Inkonsistenzen der gegenwärtigen Steuern und Abgaben

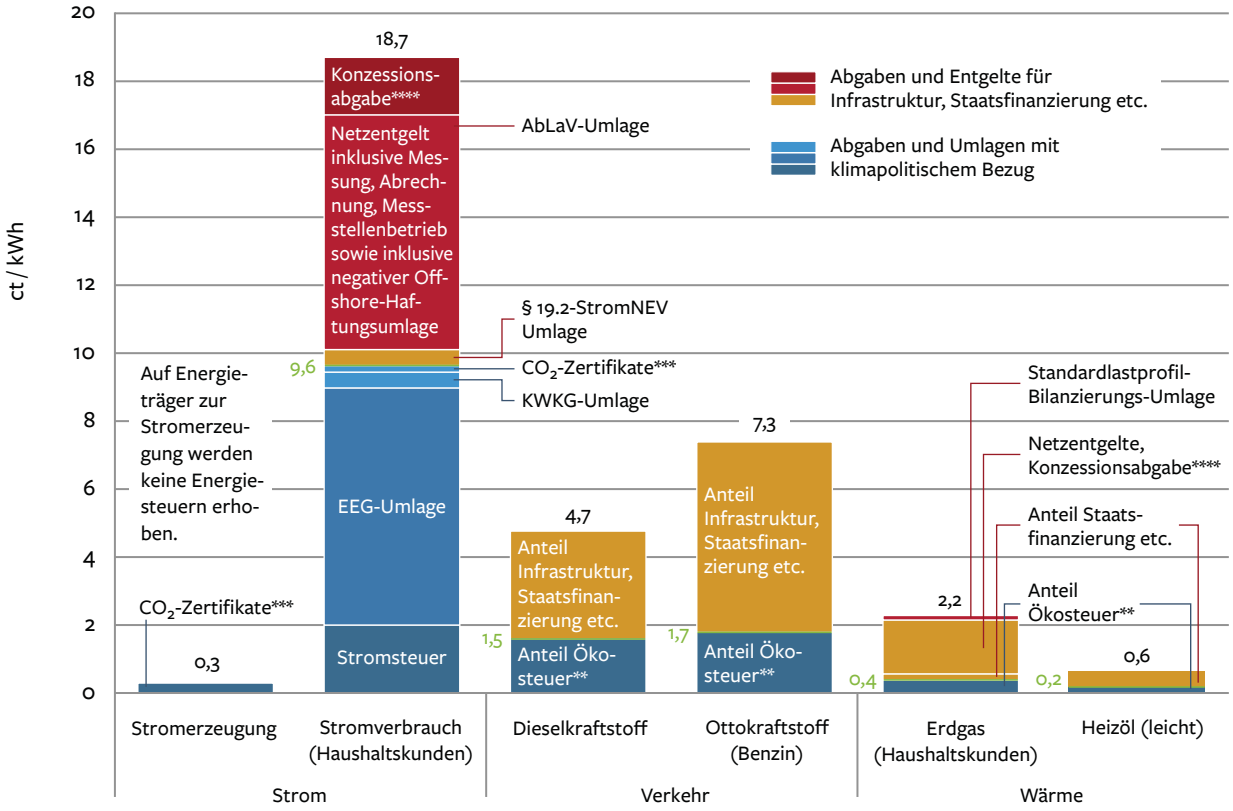
209. Auf nationaler Ebene stellt die Energiebesteuerung den wesentlichen Ansatzpunkt für eine preisliche Steuerung dar. Im Bereich Strom kommen die EEG-Umlage und die Netzentgelte hinzu. In seiner bisherigen Form weist das System von Energiesteuern und energiebezogenen Abgaben jedoch erhebliche konzeptionelle Schwächen auf. Die Steuern und Abgaben orientieren sich gegenwärtig weder konsistent am CO_2- noch am Energiegehalt der Energieträger. Sie sind dadurch wenig zielführend hinsichtlich der effizienten Erreichung der energie- und klimapolitischen Ziele (GAWEL und PURKUS 2015). Dies gilt gerade auch mit Blick auf die Sektorkopplung, die zukünftig einen wichtigen Beitrag zu einer nachhaltigen und volkswirtschaftlich effizienten Energiewende leisten soll. So weist Strom – bezogen auf den Energiegehalt – eine erheblich höhere Belastung mit staatlich veranlassten und regulierten Abgaben auf als Diesel, Benzin und Erdgas (Abb. 5-1). Dies gilt auch dann noch, wenn Netzentgelte und Konzessionsabgaben als Kosten für die Stromverteilungsinfrastruktur (vergleichbar zur Transport- und Tankstelleninfrastruktur für flüssige Kraftstoffe) ausgeklammert bleiben.

Überdies variieren die Steuersätze der Energieträger je nach Verwendungszweck. Beispielsweise wird der Bereich Wärmeerzeugung weit weniger steuerlich belastet als Kraftstoffe im Verkehr (Abb. 5-2). Dies wird auch mit sozialen Erwägungen begründet und ist bereits in der europäischen Energiesteuerrichtlinie 2003/96/EG angelegt. Durch die großen Diskrepanzen und die fehlende Systematik bei der Besteuerung entstehen jedoch Verzerrungen, die verhindern, dass Investitionen in jene Verwendungen fließen, in denen der Mitteleinsatz die größten Energie- und Treibhausgaseinsparungen bewirkt.

Vorabfassung - wird durch die endgültige Fassung ersetzt.

Abbildung 5-1

Belastung verschiedener Energieträger (je kWh) durch staatlich veranlasste und regulierte Abgaben*



* eigene Berechnungen für 2017 (vorläufig), wenn nicht anders angegeben; ohne Umsatzsteuer
** angenähert über die Erhöhung der Energiesteuern in den Jahren 1999 bis 2003 (ökologische Steuerreform)
*** mengengewichteter CO_2-Zertifikatspreis 2016
**** 2015

Quelle: Agora Energiewende 2017b, S. 16, überarbeitet

Erarbeitung eines konsistenten Gesamtkonzepts

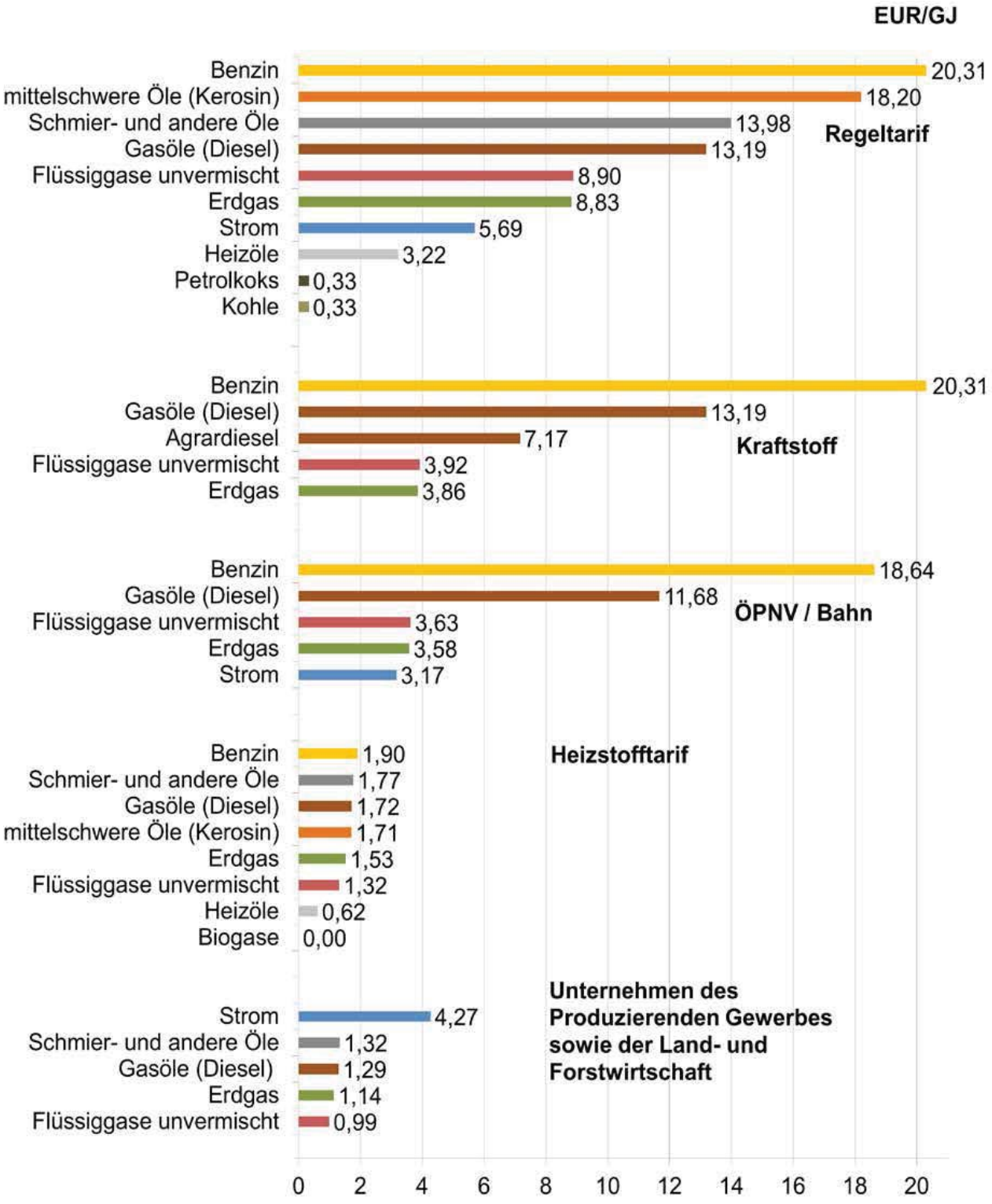
210. Der SRU sieht daher grundlegenden Reformbedarf bei der Energiebesteuerung (bereits SRU 2005, Tz. 555; 2012, Tz. 264; 2016a). Diese sollte im Rahmen einer verstärkten Ökologisierung des Steuersystems weiterentwickelt und dynamisiert werden. Dabei sollten die Steuersätze für die verschiedenen Kraftstoffe im Verkehrsbereich stärker an ihrem jeweiligen spezifischen Treibhausgaspotenzial sowie ihrem Energiegehalt ausgerichtet werden. Eine gute Ausgangsbasis hierfür bildet der – letztlich gescheiterte – Vorschlag der Europäischen Kommission zur Reform der Energiesteuerrichtlinie 2003/96/EG.

211. Zudem sollte durch eine dynamische Anpassung der Besteuerung gewährleistet sein, dass das Energiepreissignal auch im Zuge von Inflation und weiterer Effizienzfortschritte hinreichend stark bleibt, um die gesetzten Klimaziele zu erreichen. Grundsätzlich gilt, dass die Umgestaltung der energiebezogenen Steuern und Abgaben nicht aufkommensneutral erfolgen sollte: Angesichts einer seit Jahren rückläufigen realen Abgabenbelastung ist eine schrittweise Verteuerung des Energieverbrauchs im Verkehrssektor – aber auch in anderen Verbrauchssektoren – ökologisch zielführend und mit Blick auf den Rebound-Effekt sogar dringend geboten. Insgesamt ist der Anteil der auf die Umweltinanspruchnahme bezogenen Steuereinnahmen seit dem Jahr 2003 von 6,5 % auf zuletzt 4,3 % (2017, geschätzt) gesunken und liegt unterhalb des europäischen Durchschnitts (MAHLER et al. 2017, S. 6). Langfristig sollte der Anteil der Umweltsteuern deutlich ausgebaut und jener von Steuern auf Arbeit abgebaut werden. Auch eine Senkung der Sozialversicherungsbeiträge – wie bei der Ökosteuer nach 1999 geschehen – könnte aus den Einnahmen der Energiebesteuerung finanziert werden. Um den privaten Haushalten und

Vorabfassung - wird durch die endgültige Fassung ersetzt.

Abbildung 5-2

Effektive Besteuerung des Energiegehalts, nach Verwendungsbereichen, in EUR/GJ



Quelle: GAWEL und PURKUS 2015, S. 89, angepasst

Vorabfassung - wird durch die endgültige Fassung ersetzt.

Marktakteuren Planungssicherheit zu bieten, sollte der Anstieg des Energiepreispfads dabei möglichst vorhersehbar sein.

Die Bundesregierung sollte überdies eine Reform der Steuerstruktur auf europäischer Ebene unterstützen und auf die Festsetzung angemessen hoher Mindeststeuersätze hinwirken. Eine verstärkte Harmonisierung der europäischen Kraftstoffbesteuerung ist auch vor dem Hintergrund des stetig ansteigenden Anteils internationaler Verkehre (Quell-, Ziel-, Transitverkehr) am gesamten Kraftstoffverbrauch geboten, da signifikant divergierende Kraftstoffpreise – insbesondere auf internationalen Güterverkehrsrelationen – Ausweichverhalten zur Steuerumgehung induzieren.

212. Mit Blick auf die zunehmenden intersektoralen Wechselwirkungen in der Energieversorgung empfiehlt der SRU der Bundesregierung, in dieser Legislaturperiode ein konsistentes Gesamtkonzept für das System der Steuern und Abgaben im Verkehrs-, Wärme- und Stromsektor zu erarbeiten. Dieses muss den Erfordernissen eines effizienten und effektiven Klimaschutzes und dabei den Anforderungen der Sektorkopplung und eines zunehmend auf volatilen erneuerbaren Energien basierenden Erzeugungsmixes gerecht werden. Nachfolgend werden einige für den Verkehrssektor zentrale Kernelemente der notwendigen Reform skizziert.

Schneller Abbau des Dieselprivilegs

213. Prioritär sollte in dieser Legislaturperiode das Ende der Dieselprivilegierung eingeleitet werden. In Deutschland und vielen weiteren europäischen Staaten wird Dieselkraftstoff niedriger als Ottokraftstoff (Benzin) besteuert. Diese Struktur der Kraftstoffbesteuerung wird ökologischen Kriterien nicht gerecht und berücksichtigt zudem nicht die nachgewiesenen negativen gesundheitlichen Effekte. Dieselkraftstoff weist nicht nur eine höhere Energiedichte und Kohlenstoffintensität je Liter auf, sondern seine Verbrennung verursacht zudem in der Regel auch einen höheren Ausstoß gesundheits- und umweltschädlicher Luftschadstoffe. Es findet somit eine ökologisch und aus Gründen des vorsorgenden Gesundheitsschutzes nicht zu rechtfertigende steuerliche Ungleichbehandlung statt (SRU 2015b; 2017).

Der günstigere Energiesteuersatz auf Diesel gegenüber Benzin entspricht einer impliziten Subvention von circa 7,4 Mrd. Euro jährlich (UBA 2016g, S. 41). Die energiesteuerliche Privilegierung von Dieselfahrzeugen wird auch durch die höheren hubraumbezogenen Steuersätze bei der Kraftfahrzeugsteuer nicht ausgeglichen. Das Dieselprivileg ist eine Ursache dafür, dass insbesondere Dieselfahrzeuge in der Vergangenheit immer schwerer und mit immer größerer Motorisierung ausgestattet wurden (RUNKEL et al. 2016b). Hierdurch wird der theoretische Klimavorteil von Dieselfahrzeugen – aufgrund des besseren Wirkungsgrades von Dieselmotoren – neutralisiert. Dieselfahrzeuge stoßen aufgrund ihres höheren Gewichts und ihrer höheren Motorleistung etwa genauso viel CO_2 je Kilometer aus wie Benzinfahrzeuge (KBA 2017b). Eine weitere deutliche Absenkung des durchschnittlichen spezifischen CO_2-Ausstoßes der Pkw-Flotte würde durch einen verringerten Marktanteil von Dieselfahrzeugen nicht gefährdet, sie würde möglicherweise sogar begünstigt (DÍAZ et al. 2017). Seit der letzten Stufe der ökologischen Steuerreform sinken die realen Energiesteuersätze auf Kraftstoffe. Daher sollte im Zuge der steuerlichen Gleichstellung der verschiedenen Kraftstoffe der Steuersatz auf Diesel erhöht und nicht der Steuersatz auf Benzin abgesenkt werden. Der Abbau der Dieselprivilegierung sollte dabei zwar vorhersehbar und schrittweise geschehen, aber sehr kurzfristig eingeleitet werden. Um Ausweichreaktionen – das heißt Tanken außerhalb Deutschlands – zu minimieren, sollte sich die Bundesregierung zugleich auf europäischer Ebene für entsprechende Anpassungen der Kraftstoffbesteuerung einsetzen.

Abschmelzen des Erdgasprivilegs

214. Auch die Privilegierung von Erdgas als Kraftstoff im Verkehrssektor sollte nicht verstetigt werden. Erdgasfahrzeuge können zwar die Treibhausgasemissionen moderat reduzieren und die Schadstoffbelastung insbesondere in Städten mindern, sind aber ebenfalls nicht mit den langfristigen Klima- und Umweltzielen vereinbar. Das Einsparpotenzial von fossilem Erdgas ist mit maximal circa 15 bis 20 % gegenüber fossilem Ottokraftstoff begrenzt und bietet keinen nennenswerten Klimavorteil gegenüber fossilem Diesel. Überdies ist es abhängig vom Ausmaß der Methan-Leckage insbesondere in der Vorkette. Strombasiertes synthetisches Gas (Power-to-Gas – PtG) und Biogas bleiben relativ knapp und teuer, sie sollten daher vorzugsweise in anderen Bereichen als dem Straßenverkehr verwendet werden (z. B. hochflexible Gaskraftwerke zur Deckung der Residuallast im Stromsystem). Durch eine Verstetigung der Privilegierung von Erdgas könnte der ökologisch wie ökonomisch sinnvolle Umstieg auf Elektromotoren, die wesentlich höhere Wirkungsgrade aufweisen, verzögert werden. Mit Blick auf die kürzlich bis 2026 verlängerte – ab 2024 degressive – Privilegierung und den Vertrauensschutz der Kundinnen und Kunden gilt auch hier, dass der Ausstieg aus der Privilegierung sukzessive erfolgen sollte, aber das Signal

Vorabfassung - wird durch die endgültige Fassung ersetzt.

für die Beendigung dennoch klar sein muss. Im Zuge einer grundlegenden Reform der energiebezogenen Steuern und Abgaben sollte deutlich werden, dass es keine Perspektive für eine nochmalige Verlängerung der Privilegierung gibt.

Abbau von Hemmnissen für die Sektorkopplung

215. Eine komplexere Herausforderung als die konsistente Umgestaltung der Steuern auf fossile Kraftstoffe stellt die (regulatorische) Integration von Strom und strombasierten synthetischen Kraftstoffen in den Verkehrssektor dar. Für die angestrebte direkte Elektrifizierung des Straßenverkehrs ist die höhere Abgabenbelastung von Strom gegenüber erdölbasierten Kraftstoffen kontraproduktiv. Um die finanzielle Attraktivität von Strom als Energieträger im Verkehr zu steigern, muss es zu einer zumindest relativen Entlastung kommen. Dazu werden derzeit verschiedene Vorschläge diskutiert (Agora Energiewende 2017b; GÄHRS et al. 2016; PITTEL und WEISSBART 2016; MATSCHOSS und TÖPFER 2015; enervis energy advisors 2016; NESTLE 2017; Ecofys 2016a). Zu den genannten Ansätzen zählt beispielsweise eine Reduktion der Stromsteuer. Ebenfalls diskutiert werden alternative Finanzierungsmechanismen für den Ausbau der erneuerbaren Stromerzeugung. Neben einer partiellen Steuerfinanzierung und einer Fondslösung, die zu einer zeitlichen Streckung der bereits aufgelaufenen Zahlungsverpflichtungen führen würde, gilt auch die Beteiligung weiterer Energieverbrauchssektoren (insb. Verkehr und Wärmeversorgung) an der EEG-Umlage als eine Option. Ziel hierbei ist eine Absenkung der EEG-Umlage je Kilowattstunde, um Strom im Wettbewerb der Energieträger konkurrenzfähiger werden zu lassen. Zudem sollten diese Sektoren durch eine Erweiterung der EEG-Umlagebasis an den Technologieförderkosten beteiligt werden, da sie im Zuge einer Sektorkopplung auch von den durch das EEG massiv gesunkenen Kosten dieser Technologien profitieren.

Über die reine Steuer- und Abgabenhöhe hinaus scheint auch eine konzeptionelle Umgestaltung von Umlagen und Abgaben im Stromsystem erforderlich, um die energiesystemisch effiziente Kopplung der Sektoren zu unterstützen (GERHARDT et al. 2015; Agora Energiewende 2017b). Ziel ist es, die Flexibilität des Stromverbrauchs durch den Verkehr (sowie durch andere Sektoren) und zukünftig gegebenenfalls die Rückeinspeisung aus dem Verkehr zu stärken sowie an energiesystemischen Erfordernissen auszurichten. Hierzu ist eine stärkere Dynamisierung von Preisbestandteilen (v. a. von Umlagen und Netzentgelten), ausgerichtet an der temporären Knappheit des Stromangebots und Netzengpässen, zu implementieren (Agora Energiewende 2017b; Frontier Economics und BET 2016). In diesem Feld besteht weiterer Forschungsbedarf, da auch die Gefahr von „Überanreizen“ durch verstärkte Marktpreissignale besteht. Die Bundesregierung sollte daher die (Forschungs-)Bemühungen zur Erarbeitung eines Abgabenkonzepts, das eine gesamtsystemisch effiziente und an den Klimazielen ausgerichtete Sektorkopplung befördert, intensivieren.

Abfederung sozialer Härten

216. Zwar wirkt eine Verteuerung des Energieverbrauchs im Verkehrssektor weniger regressiv auf private Haushalte als bei der traditionellen Stromanwendung und in der Wärmeversorgung (HEINDL und LÖSCHEL 2015), dennoch sollten mit einer Verteuerung des Energieverbrauchs einhergehende Belastungen berücksichtigt und politisch adressiert werden. Durch die gezielte Verwendung von Einnahmen aus energie- und klimapolitischen Abgaben für einen sozialen Ausgleich können kritische Belastungswirkungen für einkommensschwache Haushalte abgefedert werden. Die sozialpolitische Flankierung klimapolitisch induzierter Preissteigerungen kann dabei zum einen durch Anpassungen des Steuersystems und der staatlichen Sozialtransfers erfolgen (ebd., S. 4 f. und 13 f.). Denkbar wäre auch eine für jede Bürgerin und jeden Bürger einheitliche Rückerstattung der staatlichen Einnahmen, wie es in der Schweiz mit der CO_2-Lenkungsabgabe geschieht. Zum anderen sollten die Einnahmen zur Schaffung attraktiver und bezahlbarer Mobilitätsangebote genutzt werden. Von diesen könnten alle Bürgerinnen und Bürger, gerade aber auch einkommensschwache Gruppen profitieren.

Verkehr und Emissionshandel

217. Seit vielen Jahren wird auch die Einbeziehung des Verkehrs in den europäischen Emissionshandel (European Union Emissions Trading System – EU ETS) als Instrument zur CO_2-Bepreisung diskutiert. Dabei wird meist der sogenannte Upstream-Ansatz als vorzugswürdige Umsetzungsoption erachtet (bspw. DEUBER 2002; FLACHSLAND et al. 2011; KAMPMAN et al. 2008; KARPLUS et al. 2013; HERMANN et al. 2014). Dieser sieht vor, dass diejenigen, die Kraftstoffe in Verkehr bringen, CO_2-Zertifikate in dem Maß vorhalten müssen, das dem CO_2-Ausstoß beim Verbrennen der Kraftstoffe entspricht. Trotz seiner theoretisch hohen Effizienz sprechen gegenwärtig verschiedene Argumente gegen die Erweiterung des europäischen Emissionshandels auf den Verkehrssektor – insbesondere als primäres oder gar alleiniges Instrument zur Treibhausgasreduktion. Zum einen leidet die theoretische Effizienz dieses Instruments unter einer Vielzahl von Marktunvollkommenheiten, die

Vorabfassung - wird durch die endgültige Fassung ersetzt.

in der Realität zu beobachten sind (MOCK et al. 2014; KASTEN et al. 2015; Cambridge Econometrics 2014; ELMER 2016, S. 63 ff.). Aufgrund dieser ist bei den derzeitigen und bis 2030 erwartbaren Zertifikatspreisen nur mit einer geringen Lenkungswirkung zu rechnen.

Zum anderen bestehen im Kontext der aktuellen strukturellen Reformen des EU ETS Unsicherheiten hinsichtlich der klimapolitischen Wirksamkeit dieser Maßnahme (SRU 2015a; 2017; ELMER et al. 2015). Bei einer Einbindung in das EU ETS würde der Verkehrssektor seine Minderungsverpflichtungen voraussichtlich in hohem Maße durch den Zukauf von Zertifikaten decken. Dieser Zukauf würde jedoch nicht zu zusätzlichen Emissionsminderungen in gleicher Höhe in anderen Sektoren führen, sondern stattdessen den derzeit im EU ETS bestehenden hohen Zertifikatsüberschuss senken. Diese überschüssigen Zertifikate würden andernfalls zu großen Teilen in die neu geschaffene Marktstabilitätsreserve überführt, aus der sie – gemäß derzeit diskutierter Reformvorschläge für das EU ETS – zu einem späteren Zeitpunkt endgültig stillgelegt werden könnten (MATTHES 2017; COWART et al. 2017). Ein Zukauf (ansonsten überschüssiger) CO_2-Zertifikate durch den Verkehrssektor anstelle eigener Emissionsminderungen würde folglich die Gesamtemissionen in der EU erhöhen. Es wäre somit klimapolitisch wirksamer, wenn der Verkehrssektor seine Klimaziele durch eigene Anstrengungen und Maßnahmen (u. a. eine separate Bepreisung von Energieverbrauch und CO_2-Emissionen) erreichte.

Auch im Falle eines durch eine echte Zertifikatsknappheit gekennzeichneten Emissionshandels könnte durch die Einbeziehung des Verkehrssektors ein klimapolitisch problematisches Szenario eintreten. In einer solchen Knappheitssituation könnte die Zertifikatsnachfrage des Verkehrs zu einem starken Anstieg der Zertifikatspreise führen. Dieser könnte möglicherweise sogenannte Carbon-Leakage-Effekte in der Industrie (d. h. die Verlagerung industrieller Produktion und Emissionen) zur Folge haben, wodurch die tatsächliche klimapolitische Effektivität des Emissionshandels geschwächt würde. Der Verkehrssektor selbst ist hingegen wenig anfällig für Carbon Leakage, sodass hier keine Ausweichreaktion durch eine ansteigende CO_2-Bepreisung zu befürchten ist. Voraussetzung für eine solche Entwicklung wäre zunächst allerdings eine – vom SRU begrüßte, derzeit jedoch unwahrscheinliche – ambitionierte Reform des EU ETS. Erst langfristig könnte die Einbeziehung von Kraftstoffen in den Emissionshandel eine sinnvolle Option sein. Dies gilt gerade mit Blick auf die zunehmende Diversifizierung der Energieträger im Verkehrssektor und seine zunehmende Verschmelzung mit anderen Sektoren, insbesondere dem Stromsektor. So unterliegt der im Verkehr eingesetzte Strom dem Emissionshandel, flüssige und gasförmige Kraftstoffe auf fossiler Basis hingegen nicht. Im Zuge der mit einer – direkten und indirekten – Elektrifizierung verbundenen Verschiebung in der Energiebasis des Verkehrssektors, steigt die Rationalität einer Erweiterung des EU ETS. Kurzfristig sind hierdurch jedoch nur sehr geringe Impulse für die jetzt einzuleitende Verkehrswende zu erwarten, bei gleichzeitigen Risiken für die klimapolitische Effektivität des Emissionshandels.

Einbindung in einen Instrumentenmix

218. Abschließend sei hervorgehoben, dass eine Reform der Energiesteuern und -abgaben nur eine – obgleich sehr wichtige – Säule im Instrumentenmix sein kann. Eine solche Reform allein kann aber nicht alle Erfordernisse der Verkehrswende gleich gut adressieren, auch wenn eine stark vereinfachte ökonomische Betrachtung dies suggerieren mag. Aufgrund verschiedener Marktunvollkommenheiten und Steuerungsaufgaben in hoheitlichem Aufgabenbereich (insb. hinsichtlich infrastruktureller Maßnahmen) ist für das Gelingen der Verkehrswende vielmehr ein Bündel verschiedener, sich gegenseitig ergänzender politischer Maßnahmen dringend erforderlich.

5.1.2 Abschaffung umweltschädlicher Subventionen im Verkehr

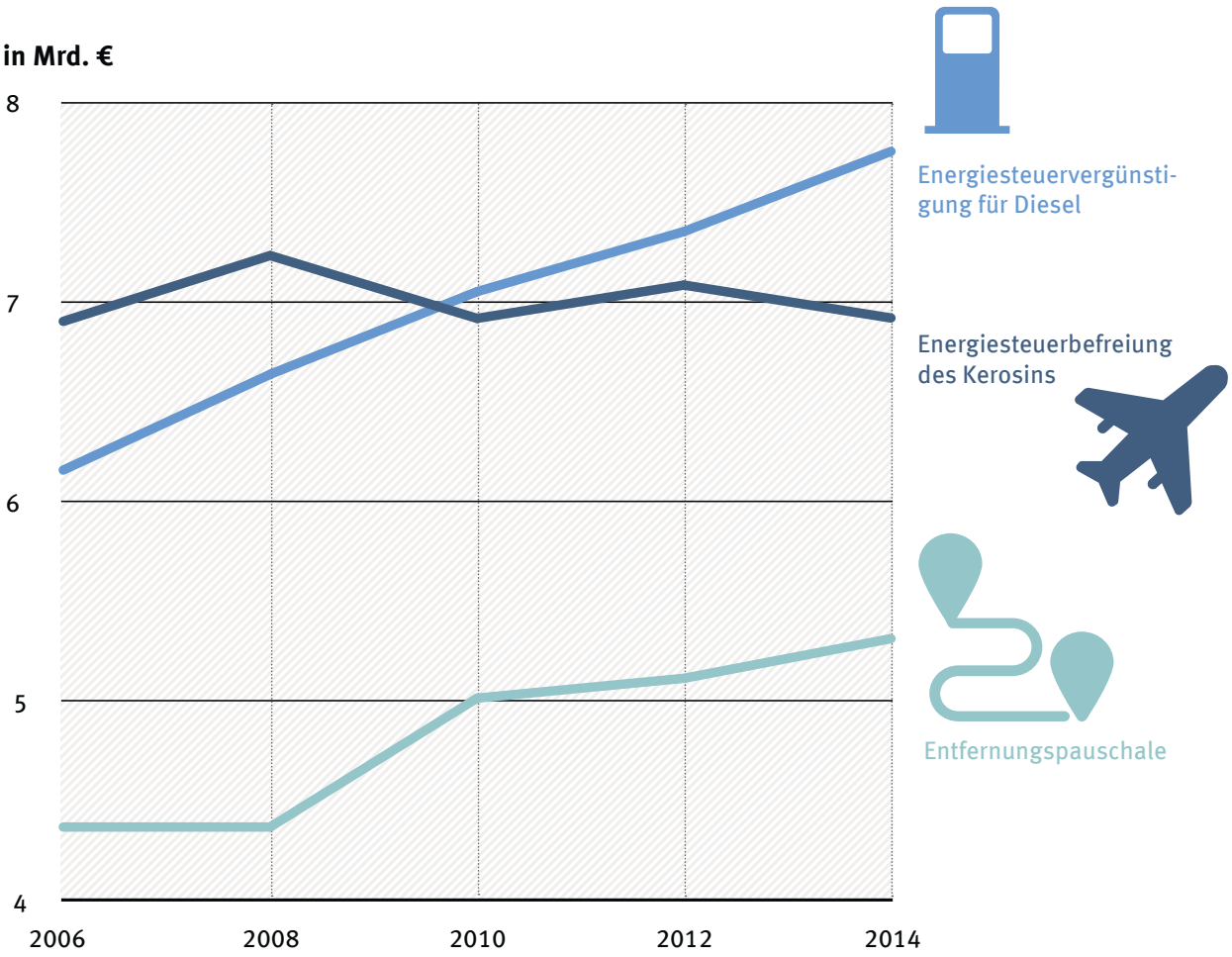
219. Der private Autoverkehr wird durch zahlreiche steuerliche Regelungen, die dem Umweltschutz zuwider laufen, direkt und indirekt subventioniert. Es ist somit wichtig, verkehrserzeugende ökonomische Anreize zu korrigieren. Eine Untersuchung umweltschädlicher Subventionen des Umweltbundesamtes (UBA) kommt zu dem Ergebnis, dass im Verkehrssektor im Jahr 2012 insgesamt Subventionen in Höhe von 28,6 Mrd. Euro zur Belastung der Umwelt beitrugen (Abb. 5-3; UBA 2016c). Der dabei verwendete Subventionsbegriff unterscheidet sich von der seitens der Bundesregierung im Subventionsbericht verwendeten Definition.

Der SRU empfiehlt grundsätzlich, umweltschädliche Subventionen des Verkehrs schrittweise abzuschaffen, einschließlich des Dieselprivilegs. Hierbei sind an vorderster Stelle die Entfernungspauschale (die auch negative Anreize im Hinblick auf die Flächeninanspruchnahme setzt)

Vorabfassung - wird durch die endgültige Fassung ersetzt.

Abbildung 5-3

Umweltschädliche Subventionen im Verkehr



Quelle: UBA 2016c, S. 32

sowie die Besteuerung privat genutzter Dienstwagen zu nennen. Die verkehrsmittelunabhängige Entfernungspauschale in Höhe von 0,30 Euro je Arbeitstag und Entfernungskilometer reduziert das zu versteuernde Einkommen und vermindert den Anreiz, den Arbeitsweg möglichst kurz zu halten.

220. Eine Sonderrolle bei den verkehrsbezogenen Steuern spielt die private Dienstwagennutzung (SRU 2012, Tz. 321). Im Jahr 2016 erfolgten 65 % aller Pkw-Neuzulassungen auf gewerbliche Halter (KBA 2017d), ein Großteil dieser Fahrzeuge wird auch privat genutzt. Die private Nutzung wird steuerlich stark bevorteilt: Auf Unternehmensseite können Betriebsausgaben für Firmenwagen in der Regel vollständig steuermindernd geltend gemacht werden. Auf Arbeitnehmerseite erhöht sich das monatliche zu versteuernde Einkommen lediglich um 1 % des Listenpreises des Fahrzeugs, wenn dieses den Arbeitnehmenden auch zur privaten Nutzung überlassen wird. Alternativ zu dieser – überwiegend genutzten – pauschalen Besteuerung kann der geldwerte Vorteil auch über ein Fahrtenbuch belegt werden. Die steuerliche Abzugsfähigkeit sämtlicher Ausgaben (inkl. Kraftstoffkosten) in Kombination mit der pauschalen Besteuerung für die private Nutzung schafft einen Anreiz für Unternehmen, einen Teil der Gesamtvergütung an die Arbeitnehmenden in Form von privat nutzbaren Dienstwagen auszuzahlen (zu den Details der Dienstwagenbesteuerung sowie den Anreizen für Arbeitgeber und Arbeitnehmer s. ausführlich DIEKMANN et al. 2011, S. 85 ff.).

Vorabfassung - wird durch die endgültige Fassung ersetzt.

Die bestehende Dienstwagenbesteuerung hat gleich mehrere ökologische Nachteile: Durch die hohen Zulassungszahlen von Firmenwagen wird die autoaffine Mobilitätskultur unterstützt; für Mitarbeitende wird durch die Übernahme der Betriebskosten durch den Arbeitgeber und die pauschale Besteuerung ein Anreiz geschaffen, verstärkt das Auto zu nutzen. Zudem bestehen durch die volle Abzugsfähigkeit von Beschaffungs- und Kraftstoffkosten kaum Anreize, kleinere und sparsamere Fahrzeuge anzuschaffen (DIEKMANN et al. 2011; ELMER 2016, S. 84 f.). Da Dienstwagen meist nur kurz in der gewerblichen Nutzung sind, prägen sie als Gebrauchtwagen die Zusammensetzung der gesamten Flotte.

221. Beide Regelungen sollten auf Bundesebene überprüft und unter Beachtung der dazu ergangenen Rechtsprechung – so hinsichtlich der Entfernungspausschale BVerfGE Bd. 122, S. 210 – neu gefasst werden (SRU 2012, Tz. 317 ff.). Neben ihren ökologischen Fehlanreizen sind bei einer Neufassung von Entfernungspauschale und Dienstwagenbesteuerung auch ihre Verteilungswirkungen zu berücksichtigen. Sowohl Entfernungspauschale als auch Dienstwagenbesteuerung wirken tendenziell regressiv, das heißt Haushalte mit geringem Einkommen profitieren in der Regel weniger von ihnen (DIEKMANN et al. 2011, S. 37). Die Gewährung von Dienstwagen, insbesondere von größeren und leistungsstärkeren Fahrzeugen, zur privaten Nutzung korrespondiert häufig mit den Einkommen. Von der Entfernungspauschale profitieren ebenfalls jene mit hohem Einkommen und somit hohem Grenzsteuersatz am stärksten. Das sozialpolitische Konfliktpotenzial einer Reform dieser Regelungen ist mithin geringer als beispielsweise bei einer Verteuerung des Energieverbrauchs insgesamt.

222. Grundsätzlich spricht sich der SRU wegen ihrer ökologischen Fehlsteuerung dafür aus, die Entfernungspauschale vollständig abzuschaffen (SRU 2012, Tz. 321 ff.). Doch selbst wenn eine schnelle Abschaffung politisch nicht durchsetzbar ist, könnte sie relativ kurzfristig so reformiert werden, dass die Anreize zum Pendeln abgeschwächt würden und zugleich die Situation insbesondere einkommensschwacher Haushalte berücksichtigt würde. Die Pauschale ließe sich so ausgestalten, dass sie nicht das zu versteuernde Einkommen verringert, sondern in Form einer Gutschrift auf die Steuerlast gewährt wird. Dann wäre der effektive Steuersparbetrag für alle Haushalte gleich, unabhängig von ihrem Einkommen. Gleichzeitig könnte der Pauschalbetrag je Kilometer deutlich abgesenkt werden. Bürgerinnen und Bürger mit geringem Grenzsteuersatz würden hierdurch nicht belastet, lediglich Haushalte mit hohem Einkommen würden Einbußen hinnehmen müssen. Der SRU empfiehlt der Bundesregierung entsprechende Reformkonzepte zu prüfen. Eine Reform von Entfernungspauschale und Dienstwagenbesteuerung würde mithin nicht nur einen wichtigen Beitrag zum Abbau umweltschädlicher Subventionen leisten, sondern könnte zudem so ausgestaltet werden, dass soziale Härten weitgehend vermieden würden.

223. Bei der Dienstwagenbesteuerung stellt die Berücksichtigung der privaten Fahrleistung bei der Bemessung des zu versteuernden geldwerten Vorteils einen wirksamen Ansatz zur Verminderung übermäßiger – da steuerlich subventionierter – Privatfahrten dar. Als administrativ unkompliziertes Vorgehen zur Abschätzung der privat gefahrenen Kilometer böte sich die Kopplung an die jährliche Gesamtfahrleistung nach Maßgabe eines pauschalisierten Anteils von Privatfahrten an. Alternativ können Arbeitnehmende ihre Privatfahrten auch über ein Fahrtenbuch belegen (DIEKMANN et al. 2011). Um die Anschaffung emissionsärmerer Dienstwagen durch die Unternehmen anzureizen, sollte die steuerliche Abzugsfähigkeit der Anschaffungskosten sowie der Betriebskosten nach den spezifischen CO_2-Emissionen differenziert werden. Dies würde bedeuten, dass die steuerliche Abzugsfähigkeit für Fahrzeuge mit geringen CO_2-Emissionen steigen, während sie für Fahrzeuge mit höheren Emissionen stufenweise absinken würde (DIEKMANN et al. 2011; UBA 2016g, S. 47).

5.2 Gezielte Förderung alternativer Antriebe

224. Bei der gezielten Förderung alternativer Antriebe ist umstritten, inwieweit ein bestimmter Transformationspfad politisch gezielt gefördert werden oder sich der Staat darauf beschränken sollte, weitgehend technologieneutrale Rahmenbedingungen vorzugeben. Wie in Kapitel 4.2 dargelegt, erachtet der SRU auf technologischer Seite eine weitgehende Substitution des fossilen Verbrennungsmotors durch elektrische Antriebe als einen zentralen Baustein für das Gelingen der Verkehrswende. Dies gilt grundsätzlich sowohl für den Straßengüterverkehr als auch für den Straßenpersonenverkehr. Insbesondere im Bereich Pkw und leichte Nutzfahrzeuge liegen bereits heute die technologischen Voraussetzungen vor, um die Transformation sehr kurzfristig einzuleiten.

Vorabfassung - wird durch die endgültige Fassung ersetzt.

5.2.1 Technologieneutralität versus gezielte Transformationsunterstützung

225. Bei der Gestaltung des politischen Rahmens für die Dekarbonisierung des Verkehrs ist es grundsätzlich möglich, die gewählten Instrumente möglichst technologieneutral auszugestalten oder bestimmte Transformationspfade gezielt zu unterstützen. Gerade von (neoklassischer) ökonomischer Seite wird in der Klimapolitik häufig Technologieneutralität eingefordert, während technologiespezifische Fördermaßnahmen als verzerrend und die Kosten des Klimaschutzes erhöhend abgelehnt werden. Die einheitliche Bepreisung des CO_2-Ausstoßes wird dabei oftmals als Prototyp eines technologieneutralen Politikinstrumentes angesehen. Ziel hierbei ist es, die externen Kosten des Treibhausgasausstoßes zu internalisieren. Als wesentlicher Vorteil eines solchen Vorgehens wird gesehen, dass der Staat es dem Markt überlässt, die kostengünstigsten Lösungen zur Reduktion der Treibhausgasemissionen zu identifizieren.

226. Im Grundsatz ist es durchaus zu unterstützen, dass die Bürgerinnen und Bürger sowie die Unternehmen darüber entscheiden sollten, mithilfe welcher Technologien sie die gesetzten Klimaziele verfolgen. Allerdings gilt die Annahme, dass ein offener Wettbewerb der verschiedenen Technologien zur kostenminimalen Zielerreichung führt, nur dann, wenn die Technologien unter fairen Startbedingungen miteinander konkurrieren. Sie gilt nicht mehr, wenn bereits ausgereifte und etablierte Technologien mit solchen konkurrieren, die sich noch in relativ frühen Entwicklungsstadien befinden und hohe Kostensenkungspotenziale aufweisen. Diese innovativen Technologien haben oftmals das Potenzial, in einer langfristigen Perspektive die gesetzten Klimaziele kostengünstiger zu erreichen, als dies mit den etablierten Technologien möglich wäre – sofern ambitionierte Ziele mit den etablierten Technologien überhaupt zu erreichen sind.

Kurzfristig sind die neuen Technologien allerdings meist teurer als die etablierten Technologiesysteme, die ihr Kostensenkungspotenzial (z. B. durch Größen- und Lernkurveneffekte) schon weitgehend ausgeschöpft haben. Verstärkt werden die anfänglichen Wettbewerbsnachteile innovativer Technologien, wenn der parallele Aufbau einer investitionsintensiven komplementären Versorgungsinfrastruktur notwendig ist. So steht beispielsweise die sich in einem noch relativ frühen Entwicklungsstadium befindliche Elektromobilität mit ihrem dünnen Netz an Ladepunkten in Konkurrenz mit dem technisch weit ausgereiften Verbrennungsmotor und seinem dichten Tankstellennetz. Eine rein technologieneutrale Politik würde es erschweren, die zugunsten des Verbrennungsmotors bestehenden Pfadabhängigkeiten aufzubrechen.

Um einen fairen Wettbewerb zu ermöglichen, müssen die innovativen Technologien zunächst an den Markt herangeführt werden. Technologieneutrale Ansätze wie die CO_2-Bepreisung bieten jedoch keine hinreichende Unterstützung, um neue Technologien aus Nischen zur breiten Marktreife zu bringen, weshalb notwendige Investitionen in transformative Innovationen unterbleiben oder zumindest verzögert werden können (FOX et al. 2017). Überdies kann eine vermeintlich technologieneutrale Regulierung des CO_2-Ausstoßes zu unerwünschten Folgen in anderen Bereichen führen, wenn sie nicht von anderen Instrumenten gerahmt wird (AZAR und SANDÉN 2011). Beispielhaft seien hier die ökologischen und gesundheitlichen Belastungen durch Dieselabgase genannt, die sich zumindest partiell auch auf die technologieneutrale Einführung von CO_2-Grenzwerten zurückführen lassen dürften.

Technologiespezifische Instrumente können hingegen helfen, Technologiekosten zu senken und damit innovativen klimafreundlichen Technologien den Übergang von der Nische in das neue System zu ermöglichen. Ohne eine gezielte Förderung würden sie sich nicht oder zu langsam entwickeln, wodurch die – langfristig gesamtwirtschaftlich effiziente – Zielerreichung gefährdet wäre. Die gezielte Förderung von Transformationsprozessen sollte durch eine politische Vision und entsprechende Langfristziele unterlegt sein, die Richtungs- und Investitionssicherheit für die beteiligten Akteure bieten (SRU 2016a, S. 33). Ein solches Vorgehen hilft dabei, Fehlinvestitionen in Technologien und die dazugehörigen Infrastrukturen zu vermeiden.

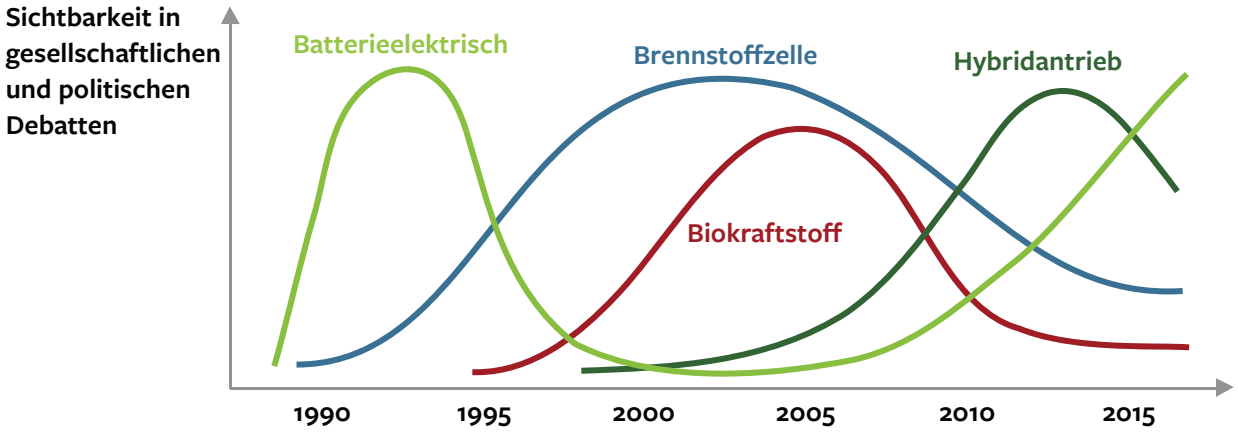
227. Zur Förderung von technologischen Transformationen stehen der Politik verschiedene Instrumente zur Verfügung. So kann sie Innovationen unterstützen, aber auch hemmende Strukturen abbauen (SRU 2016a, S. 32). Welche Instrumente sich eignen, hängt dabei insbesondere vom Stadium des Transformationsprozesses ab, in dem sich ein Sektor befindet.

Die politische Herausforderung ist, dass häufig eine Reihe konkurrierender technischer Optionen existieren, deren langfristige Entwicklungspotenziale mit Unsicherheiten

Vorabfassung - wird durch die endgültige Fassung ersetzt.

Abbildung 5-4

Aufmerksamkeitszyklen alternativer Antriebe



SRU 2017; basierend auf GEELS 2012, S. 477

behaftet sind. Die Entscheidung für eine Technologie und die Implementierung entsprechender technologiespezifischer Förderinstrumente ist dann meist mit hohen spezifischen Investitionen in die Marktentwicklung und den Aufbau von Infrastrukturen verbunden. Eine zu frühe Entscheidung für eine letztendlich suboptimale Technologie ist folglich mit der massiven Fehlallokation von Mitteln verbunden, welche die Kosten der sektoralen Transformation vervielfachen könnte (FOX et al. 2017, S. 145). Diese Problematik ist im Verkehr von hoher Relevanz, da die wissenschaftliche und öffentliche Debatte über die zentralen Antriebstechnologien der Zukunft in den letzten 25 Jahren von einer Reihe von Aufmerksamkeitszyklen geprägt war (s. Abb. 5-4; GEELS 2012, S. 823). Übermäßig optimistische Erwartungen an die Fortschritte, Marktreife und Potenziale der Technologien führten häufig zu Enttäuschungen und in der Folge zu einer Verschiebung der Aufmerksamkeit, sodass keine alternative Technologie die klare Oberhand gewinnen konnte. Insgesamt führte die Unsicherheit zu einer gewissen Lähmung des Sektors, wodurch in Nischen (von neuen Akteuren) erprobte Technologien nicht den Übergang in den Massenmarkt und ein neues System schafften. Die Unsicherheiten über die dominanten Technologien des zukünftigen sozio-technischen Systems waren zu groß, sodass die zentralen Unternehmen der Branche die für eine Transformation des Sektors notwendigen Investitionen in neue Technologien in die Zukunft verschoben (UNRUH 2000, S. 823). Auch Regierungen folgten in ihrer Forschungsförderung häufig diesen Zyklen und verhinderten so einen nachhaltigen technologischen Lernprozess (MELTON et al. 2016).

Gerade in einem solchen Klima bedarf es früher oder später jedoch einer politischen Vision für die Mobilität der Zukunft sowie Planungs- und Investitionssicherheit durch staatliche Langfristziele und entsprechende politische Maßnahmen. Dies gilt umso mehr, da auch die globale Debatte zur Zukunft der Mobilität in den letzten Jahren an Dynamik gewonnen hat. Parallel zu einem entschlossenen politischen Handeln bedarf es jedoch auch der regelmäßigen Überprüfung des eingeschlagenen Weges und des Nachsteuerns, wenn sich die an ihn geknüpften Erwartungen als falsch erweisen.

228. Eine gezielte Transformationsförderung muss dabei allerdings nicht notwendigerweise in großer technologischer Detailtiefe und exklusiv auf eine Technologie ausgerichtet erfolgen. Sie kann auch mehrgleisig angelegt sein, wobei die Förderintensität variieren kann. So wurden und werden mit dem Erneuerbare-Energien-Gesetz (EEG) verschiedene Stromerzeugungstechnologien gefördert, die sich aufgrund unterschiedlicher Einspeiseprofile – und jeweiliger Restriktionen beim Ausbau – gegenseitig sinnvoll ergänzen. Im Bereich der Antriebstechnologien scheint mittlerweile klar, dass – insbesondere im Pkw-Segment – der Verbrennungsmotor aufgrund seines niedrigen Well-to-Wheel-Wirkungsgrads keine nachhaltige Option der Dekarbonisierung darstellt. Um frühzeitig einen langfristig effizienten Emissionsminderungspfad für den Straßenverkehr einzuschlagen und spätere Strukturbrüche zu vermeiden, ist die gezielte Unterstützung alternativer Antriebsformen ökologisch und ökonomisch geboten. Klar erscheint inzwischen ebenfalls, dass (batterie-)elektrische Fahrzeuge eine

Vorabfassung - wird durch die endgültige Fassung ersetzt.

zentrale Rolle im Technologieportfolio der Zukunft spielen werden. Ein Förderfokus auf diese Technologie in den kommenden Jahren ist daher zu rechtfertigen.

5.2.2 Quotenregelung für alternative Antriebe

229. Technologien, die auf einem bereits etablierten System technischer, infrastruktureller und auch institutioneller Natur aufbauen, haben – wie zuvor dargelegt – einen immanenten Wettbewerbsvorteil. Angesichts der bestehenden Pfadabhängigkeiten zugunsten des auf Verbrennungsmotoren basierenden Kraftverkehrs sollten die politischen Rahmenbedingungen so gestaltet werden, dass die Entwicklung und Marktdurchdringung neuer Antriebstechnologien gezielt unterstützt wird. Im Lichte der sehr ungleichen Startbedingungen der verschiedenen Technologiealternativen hat dabei das Argument der – scheinbaren – Technologieneutralität hinter das Ziel der robusten klimapolitischen Zielerreichung zurückzutreten.

Mittels CO_2-Grenzwerten bzw. Effizienzvorgaben oder fiskalischer Instrumente lassen sich auch Anreize für die Entwicklung und Vermarktung elektrischer Antriebe setzen. Im Hinblick auf die angestrebte Marktdurchdringung alternativer Antriebe sind diese Instrumente jedoch wenig zielgenau. Zudem können abhängig von der genauen Ausgestaltung unerwünschte Wechselwirkungen mit anderen umwelt- und verkehrspolitischen Zielen auftreten: Beispielsweise kann eine über CO_2-Grenzwerte angereizte schnelle Marktdurchdringung elektrischer wAntriebe die Erschließung wirtschaftlicher Effizienzpotenziale in der konventionellen Flotte gefährden (vgl. Tz. 236 ff.).

230. Zielgenauer lässt sich der Markthochlauf alternativer Technologien mittels einer Quotenregelung steuern. Durch diesen ordnungsrechtlichen Ansatz würden die Fahrzeughersteller dazu verpflichtet, einen bestimmten Anteil alternativer Antriebe bei ihren Neufahrzeug-Verkäufen zu erreichen. Intention einer solchen Regelung ist es, gezielt alternative Antriebe in den Markt zu bringen und hierdurch die notwendige technologische Transformation wirksam anzustoßen. Durch die Realisierung von Skaleneffekten (Kostendegression durch Massenproduktion und Lernkurven) und Netzwerkeffekten (Entwicklung komplementärer Dienste, z. B. bei Ladeinfrastruktur) sollen die neuen Technologien wettbewerbsfähig und der technologische Wandel selbsttragend werden.

Die größere Verbindlichkeit einer Quotenregelung (gegenüber indirekten Anreizinstrumenten) hinsichtlich der technologiepolitischen Zielerreichung bewirkt, dass herstellerseitig Ressourcen planungssicher in die Weiterentwicklung und den Markthochlauf dieser Technologien investiert werden können. Zudem wird der Aufbau einer entsprechenden Energieversorgungsinfrastruktur und weiterer komplementärer Angebote attraktiver, wenn die Marktdurchdringung der alternativen Antriebe ordnungsrechtlich geregelt ist.

Ausgestaltungsoptionen einer Quote

231. Im Rahmen einer Quotenregelung können die verschiedenen nicht verbrennungsmotorischen Antriebe (batterieelektrische Antriebe, Hybride, Brennstoffzellen) gleichrangig oder unterschiedlich behandelt werden. Sowohl unter ökologischen Gesichtspunkten als auch unter dem Blickwinkel der Technologieförderung ist eine differenzierte regulatorische Behandlung eindeutig vorzugswürdig. Da sie weiterhin auch teilweise durch einen Verbrennungsmotor angetrieben werden, sollte Hybridfahrzeugen dann grundsätzlich ein geringerer Beitrag zur Quotenerreichung angerechnet werden als Fahrzeugen mit ausschließlich elektrischem Antrieb. Zum einen gehen Hybridfahrzeuge mit höheren CO_2- und Schadstoffemissionen einher, zum anderen sind die von ihnen ausgehenden positiven Transformationseffekte geringer als bei vollständig elektrifizierten Antrieben. Zu Letzteren zählen beispielsweise die Anreizung des Infrastrukturaufbaus oder Kostendegressionseffekte in der Batterieproduktion.

Im Rahmen einer Quotenregelung können den verschiedenen Antrieben unterschiedlich hohe sogenannte Credits gutgeschrieben werden. Die Credits für Hybridfahrzeuge würden dann niedriger ausfallen als für rein batterieelektrische und Brennstoffzellenfahrzeuge. Die Credit-Höhe könnte überdies sinnvollerweise gemäß der rein elektrischen Reichweite gestaffelt werden. Zudem wäre ein Handelsmechanismus mit Credits zwischen den Herstellern denkbar, um den einzelnen Herstellern eine höhere Flexibilität zu gewähren und die Gesamtkosten der Zielerreichung zu mindern. Eine solche verbindliche und zugleich handelbare Quote, bei der der Zuteilungsmechanismus für Credits nach Technologien und elektrischer Reichweite differenziert ist, wurde in Kalifornien durch das Zero Emission Vehicles Program bereits vor längerer Zeit eingeführt (UBA 2016g; GREENE et al. 2013).

Das Beispiel Kalifornien zeigt auch die Risiken einer Quotenregelung: Die anfänglichen Vorgaben für Zero

Vorabfassung - wird durch die endgültige Fassung ersetzt.

Emission Vehicles waren zu ambitioniert bzw. die Technologie noch nicht weit genug vorangeschritten, sodass sich die Quote letztendlich als nicht hinreichend glaubwürdig und somit weitgehend wirkungslos erwies. Diese Sorge erscheint aber mit Blick auf die Elektromobilität nicht mehr angemessen. Auch das Zero Emission Vehicles Program hat sich inzwischen als Treiber der technologischen Transformation erfolgreich etabliert.

25 % bis 2025

232. Der SRU spricht sich daher für die Einführung und schrittweise Erhöhung einer Quote für elektrische Antriebe im Segment der Pkw und leichten Nutzfahrzeuge ab dem Jahr 2020 aus. Eine aktuelle Studie im Auftrag des UBA kommt zu dem Ergebnis, dass bis zum Jahr 2030 in Deutschland ein Bestand von 12 Mio. Elektrofahrzeugen erreicht sein muss, um den im Klimaschutzplan 2050 formulierten Zielen für den Verkehrssektor (Reduktion auf 95–98 Mio. t CO_2 bis 2030) auch nur nahe zu kommen (BERGK et al. 2017). Dies gilt selbst bei gleichzeitigen Vermeidungs- und Verlagerungsanstrengungen. Um einen Bestand von 12 Mio. Elektrofahrzeugen bis zum Jahr 2030 zu erreichen, wird ein Zulassungsanteil in Höhe von mindestens 30 % bis 2025 und 70 % bis 2030 zugrunde gelegt. Die Flotte der Elektrofahrzeuge teilt sich dabei in ein Drittel batterieelektrische und zwei Drittel Hybridfahrzeuge auf, die einen elektrischen Fahranteil von 61 % aufweisen. Auf Basis dieser Annahmen wird für das Jahr 2030 ein Emissionswert von 100 Mio. t CO_2 ermittelt.

In Anlehnung an diese Berechnungen empfiehlt der SRU für das Jahr 2025 eine Quote rein elektrischer Fahrzeuge in Höhe von mindestens 25 % der Neuzulassungen. Auch unter Berücksichtigung der Ankündigungen verschiedener Hersteller zum Ausbau der Elektromobilität erscheint diese Zielmarke realistisch. Um einen vollen Credit-Wert von 1 zu generieren, müssen die Fahrzeuge dabei eine noch zu definierende reale Mindestreichweite aufweisen. Diese Reichweitenvorgabe soll sicherstellen, dass die elektrischen Fahrzeuge von den Käuferinnen und Käufern möglichst als vollwertiger Ersatz für ein Fahrzeug mit Verbrennungsmotor und nicht lediglich als Zweit- bzw. Ergänzungsfahrzeug angeschafft werden. Hierdurch würde voraussichtlich ein leicht höherer elektrischer Fahranteil an der Gesamtfahrleistung erreicht als unter den Annahmen von BERGK et al. (2017). Auch batterieelektrische Fahrzeuge mit einer geringeren Reichweite und Hybridfahrzeuge können auf die Quote angerechnet werden. Der Wert der von ihnen generierten Credits würde jedoch – nach elektrischer Reichweite gestaffelt – niedriger ausfallen. Die Quote für das Jahr 2030 sollte bereits heute verbindlich auf mindestens 50 % festgelegt werden, wobei spätestens im Jahr 2025 im Rahmen einer Zwischenevaluation über eine Anhebung der Quote zu entscheiden ist. Insgesamt muss die Umstellung bei den Neuzulassungen mit Blick auf die Nutzungsdauer der Fahrzeuge bis spätestens Mitte der 2030er-Jahre abgeschlossen sein.

Die durch die Quote beschleunigte Marktdurchdringung elektrischer Antriebe sollte möglichst noch in die Formulierung weiterentwickelter CO_2-Grenzwerte einfließen (s. Tz. 235 ff.), weshalb eine schnelle Verabschiedung der Quote empfohlen wird. Die Grenzwerte können dann so ausgestaltet werden, dass sie auch bei Erreichen der Quotenvorgabe weiterhin Anreize für die Verbesserung der Fahrzeugeffizienz setzen (Tz. 243). Hinsichtlich ihrer ökologischen und technologieförderpolitischen Wirksamkeit sowie mit Blick auf die Vermeidung von Verzerrungen innerhalb des europäischen Fahrzeugmarktes hält es der SRU grundsätzlich für vorzugswürdig, die Quote auf EU-Ebene zu verankern. Sollte eine zügige Einigung – im Rahmen der Weiterentwicklung der europäischen Effizienzregulierung – nicht möglich sein, empfiehlt der SRU der Bundesregierung, eine Quotenregelung auf nationaler Ebene umzusetzen.

Einbettung der Quote in eine konsistente Gesamtstrategie

233. Letztlich sollte eine erfolgreiche Strategie zur schnellen Marktdurchdringung elektrischer Fahrzeuge sowohl Push- als auch Pull-Elemente umfassen. Die Quote stellt dabei den zentralen Push dar, der für eine ausreichende Verfügbarkeit von attraktiven Elektrofahrzeugen sorgen kann. Die Verfügbarkeit einer hinreichend dichten Energieversorgungsinfrastruktur sowie ökonomische und weitere Anreize können für einen Nachfrage-Pull sorgen, sodass die ordnungsrechtlich vorgegebenen Anteile auch tatsächlich erreicht werden. Den Aufbau der benötigten Ladeinfrastruktur schnell und energisch voranzutreiben ist dabei von herausgehobener Bedeutung (Tz. 250 ff.).

Abschließend sei noch einmal auf die industriepolitische Dimension einer ehrgeizigen Politik zur Förderung alternative Antriebe hingewiesen (Tz. 176 ff.). Würde die großflächige Marktdurchdringung und Massenfertigung von Elektrofahrzeugen aufgrund der geplanten Quote und der dortigen Marktzutrittsbeschränkungen vor allem in China beginnen, drohte die heimische Industrie bei einer für die Dekarbonisierung entscheidenden Zukunftstechnologie ins Hintertreffen zu geraten.

Vorabfassung - wird durch die endgültige Fassung ersetzt.

5.3 Instrumente zur Verbesserung der Fahrzeugeffizienz: Grenzwerte und fiskalische Anreize

234. Um den Verkehr nahezu vollständig und möglichst nachhaltig zu dekarbonisieren, wird der weitgehende Umstieg auf elektrische Antriebe unumgänglich sein. Vor dem Hintergrund ihres höheren Wirkungsgrades und der geringeren lokalen Umweltbelastungen sind elektrische Antriebe dem Verbrennungsmotor in der Nutzung ökologisch eindeutig überlegen, was sich letztlich auch in einer besseren Bilanz über den gesamten Lebenszyklus niederschlägt. Gleichwohl sollten auch elektrische Fahrzeuge möglichst energieeffizient sein, um den benötigten Zubau von erneuerbaren Stromerzeugungskapazitäten und die damit verbundenen Kosten, die Rohstoffinanspruchnahme und Umweltbelastungen zu minimieren.

In den nächsten 10 bis 15 Jahren (und in Nischenanwendungen möglicherweise noch länger) werden zudem weiterhin Pkw mit Verbrennungsmotoren in großen Zahlen verkauft, die bis mindestens in die 2040er-Jahre im Fahrzeugbestand verbleiben werden. Gleiches gilt für Lkw, bei denen Verbrennungsmotoren – auch als Ergänzung zum elektrischen Antrieb – voraussichtlich noch länger und häufiger zum Einsatz kommen werden. Auch für diese verbrennungsmotorischen Fahrzeuge müssen die weiterhin bestehenden Potenziale zur Effizienzverbesserung genutzt werden.

Der Energieverbrauch des Verkehrs wird sich in den kommenden Jahren auch weitgehend in entsprechenden CO_2-Emissionen niederschlagen, weil die Dekarbonisierung der Energieversorgung des Verkehrssektors in größerem Umfang voraussichtlich erst nach dem Jahr 2030 stattfinden wird. Der Gesamtbeitrag des Verkehrs zu Deutschlands Klimaschutzzielen wird daher wesentlich durch seinen Energieverbrauch – bzw. dessen Reduktion – in den nächsten anderthalb Dekaden bestimmt. Ohne eine ambitionierte Effizienzstrategie für alle Fahrzeug- und Antriebsarten werden die kumulierten Emissionen des Verkehrs bereits deutlich vor dem Jahr 2050 das mit den Paris-Zielen vereinbarte Treibhausgasbudget des Verkehrssektors überschreiten (BERGK et al. 2017).

5.3.1 Weiterentwicklung der europäischen CO_2-Grenzwerte

235. In allen großen Fahrzeugmärkten der Welt werden der spezifische Kraftstoff- oder Energieverbrauch bzw. die spezifischen CO_2-Emissionen ordnungsrechtlich reguliert (YANG und BANDIVADEKAR 2017, S. 6 ff.). Durch die kontinuierliche Verschärfung der Anforderungen können die Hersteller dazu gezwungen werden, die Effizienz ihrer Fahrzeuge stetig zu verbessern. Vorreiter hierbei waren die USA, in denen bereits im Jahr 1975 – im Zuge der ersten Ölkrise – die Corporate Average Fuel Economy Standards eingeführt wurden. Diese Maßnahme war allerdings vor allem durch eine Verminderung der Abhängigkeit von Ölimporten und weniger umweltpolitisch motiviert. In Europa wurden verbindliche Vorgaben zum spezifischen CO_2-Ausstoß erstmals 2009 verabschiedet und ab 2012 graduell eingeführt.

5.3.1.1 Pkw-Grenzwerte

236. Für Pkw und leichte Nutzfahrzeuge bilden die europäischen CO_2-Grenzwerte das zentrale Instrument zur Verbesserung der Fahrzeugeffizienz. Nach derzeitigem Stand tritt die letzte Verschärfung der Grenzwerte im Jahr 2021 vollständig in Kraft. Die durchschnittlichen Emissionen aller neu verkauften Pkw müssen dann den Grenzwert von 95 g CO_2 je Fahrzeugkilometer einhalten, gemessen auf dem Prüfstand im NEFZ (Neuer Europäischer Fahrzyklus), für leichte Nutzfahrzeuge liegt der bereits 2020 einzuhaltende Wert bei 147 g CO_2 je Fahrzeugkilometer.

237. Um die erheblichen weiterhin bestehenden Effizienzpotenziale zu erschließen, müssen die Grenzwerte auch über 2020/2021 hinaus ambitioniert verschärft werden. Damit die Hersteller Planungssicherheit und ausreichend Vorlaufzeit für die Entwicklung effizienter Fahrzeuge haben, sollte die Bundesregierung im Rahmen des laufenden Rechtsetzungsprozesses auf eine schnelle Einigung auf anspruchsvolle Zielvorgaben hinwirken. Dabei sollten bereits Zielwerte für das Jahr 2030 sowie verbindliche Zwischenziele für 2025 (bzw. eine verbindliche Trajektorie zum 2030-Ziel) festgelegt werden, wobei nach fünf Jahren eine Zwischenevaluation erfolgen sollte, in der das 2030-Ziel mit Blick auf die klimapolitischen Notwendigkeiten geprüft wird.

Neue Metrik für die Effizienzregulierung

238. Neben einer Verschärfung ist zudem eine strukturelle Weiterentwicklung der Grenzwerte notwendig, um

Vorabfassung - wird durch die endgültige Fassung ersetzt.

Tabelle 5-1

Vor- und Nachteile verschiedener potenzieller Metriken zur Effizienzregulierung

Metrik	Fokus [Einheit]	Vorteile	Nachteile
Well-to-Wheel-Emissionen	Treibhausgasemissionen entlang der gesamten Energieversorgungskette [CO_{2eq}/km]	Ganzheitliche Erfassung der Klimabilanz	Rechtliche Komplikationen sowie methodische Erfassungsprobleme, z. B. – durchschnittliche vs. marginale Emissionen – CO_2-Intensität des Strommixes variiert über die Zeit und zwischen EU-Staaten
		Marktdurchdringung elektrischer Antriebe hat keinen starken Hebel auf effektiven Zielwert (für konv. Fahrzeuge)	
		Effizienzanreize für alle Antriebstechnologien	Vorkettenemissionen unterliegen nicht der Kontrolle durch Hersteller
Endenergie-standards	Endenergieverbrauch im Fahrzeug [J/km]	Einfache Messbarkeit erleichtert schnelle Einführung	Umwandlungsverluste in der Vorkette bleiben unberücksichtigt
		Effizienzanreize für alle Antriebstechnologien	Unterschiedliche ökonomische und ökologische Wertigkeit verschiedener Endenergieträger.
		Regulatorische Anreize für (endenergieeffiziente) elektrische Antriebe	Moderate Risiken für effektiven Zielwert der konv. Flotte wegen Hebelwirkung elektrischer Antriebe
Primärenergie-standards	Energieverbrauch entlang der gesamten Energieversorgungskette [J/km]	Umwandlungsverluste in der Vorkette werden erfasst	Rechtliche sowie methodische Probleme ähnlich wie bei Well-to-Wheel-Standards.
		Berücksichtigt, dass jede Form der Energieerzeugung (auch erneuerbare) mit Umweltbelastungen einhergeht	Unterschiedliche ökonomische und ökologische Wertigkeit verschiedener Primärenergie-quellen bleibt unberücksichtigt
Technologie-spezifische Grenzwerte	Spezifische Energieeinsparpotenziale der verschiedenen Antriebstechnologien [kann zwischen Antriebstechnologien variieren]	(Wirtschaftliche) Effizienzpotenziale jeder Antriebstechnologie können gezielt adressiert werden	Herstellern wird Flexibilität bei der Zielerreichung genommen
		Keine Hebelwirkung zwischen Antriebstechnologien. Für jede Antriebsart kann ein Mindestmaß an Effizienzverbesserungen realisiert werden	Fehlender regulatorischer Anreiz zum Technologieumstieg
			Festsetzung von spezifischen Zielwerten insbesondere für Hybridfahrzeuge methodisch komplex

SRU 2017

der zunehmenden Diversifizierung der Antriebstechnologien Rechnung zu tragen. Die aktuellen Grenzwerte regulieren lediglich die Auspuffemissionen, die Vorkette der Energiebereitstellung bleibt unberücksichtigt. Bei reinen Elektrofahrzeugen (inkl. Brennstoffzellenfahrzeugen) entstehen allerdings keine Auspuff-CO_2-Emissionen. Die dem Betrieb von Elektrofahrzeugen zuzurechnenden Emissionen sowie ein Großteil der Energieumwandlungsverluste fallen bereits in der Vorkette (d. h. bei der Stromerzeugung bzw. der Wasser-

Vorabfassung - wird durch die endgültige Fassung ersetzt.

stoffherstellung) an. Daher ist zukünftig eine andere Metrik für die Grenzwerte anzuwenden oder für diese Fahrzeuge eine separate Effizienzregulierung zu etablieren. Ansonsten bestünden für diese Fahrzeuge keine regulativen Anreize, ihre vorhandenen Effizienzpotenziale auszuschöpfen. Potenziale zur Reduktion des Stromverbrauchs (bzw. Wasserstoffverbrauchs) und der damit verbundenen CO_2-Emissionen sowie weiteren Umweltbelastungen blieben ungenutzt.

Mit Blick auf Unsicherheiten bezüglich der Marktdurchdringung elektrischer Antriebe bestehen überdies Risiken, dass gesamtwirtschaftlich kostengünstige und auch für die Nutzenden wirtschaftliche Effizienzpotenziale bei Fahrzeugen mit Verbrennungsmotor nicht ausgeschöpft werden. Durchdringen Elektrofahrzeuge schneller als vom Regulierer antizipiert den Markt, würde bei gleichbleibender Metrik (d. h. Auspuff-CO_2-Emissionen) der effektive von verbrennungsmotorischen Fahrzeugen einzuhaltende Grenzwert aufgeweicht. Hierdurch würde voraussichtlich sowohl der Gesamtenergieverbrauch als auch – unter Berücksichtigung von Emissionen in der Vorkette – der Gesamt-CO_2-Ausstoß der Fahrzeugflotte ansteigen (LUTSEY 2017; ELMER 2016, S. 262 ff.).

239. Um den bisherigen, auf Auspuffemissionen fokussierenden Regulierungsansatz zu ersetzen oder zumindest zu ergänzen, sind grundsätzlich verschiedene Alternativen denkbar (ELMER 2016, S. 310 ff.; JÖHRENS und HELMS 2013). So könnten künftig die Well-to-Wheel-Emissionen oder der spezifische Energieverbrauch der Fahrzeuge reguliert werden. Bei all diesen Regulierungsvarianten würden alle Fahrzeuge – unabhängig von ihrer Antriebstechnologie – Effizienzanreizen unterliegen. Eine Regulierung des Energieverbrauchs würde der Tatsache Rechnung tragen, dass jegliche Form von Energieerzeugung mit Beeinträchtigungen der Umwelt verbunden ist. Denkbar wäre hierbei eine Regulierung des Endenergieverbrauchs oder des Primärenergieverbrauchs. Letzteres Effizienzmaß würde Umwandlungsverluste in der Vorkette miterfassen und somit ein umfassenderes Bild zeichnen, wäre aber methodisch erheblich komplexer – ähnlich der methodischen Herausforderungen bei der Bestimmung von Well-to-Wheel-Emissionen. Überdies wäre eine nach Antriebstechnologien differenzierte Regulierung möglich: Durch antriebsspezifische Effizienzziele könnte sichergestellt werden, dass für jede Antriebstechnologie ein Mindestmaß von – wirtschaftlich umsetzbaren – Effizienzverbesserungen realisiert würde. Tabelle 5-1 fasst die spezifischen Stärken und Schwächen der aufgezeigten Regulierungsalternativen zusammen.

Duale Regulierung aus Endenergiestandards und technologiespezifischen Mindesteffizienzvorgaben

240. Denkbar ist durchaus auch eine Kombination verschiedener Metriken und Regulierungsansätze. So werden beispielsweise in den USA der spezifische Kraftstoffverbrauch und der CO_2-Ausstoß separat – wenn auch aufeinander abgestimmt – reguliert. Mit Blick auf die zukünftige Diversifizierung des Antriebsportfolios und die damit verbundenen Unsicherheiten könnten auf den Endenergieverbrauch bezogene Flottengrenzwerte und antriebstechnologiespezifische Mindesteffizienzvorgaben sinnvoll kombiniert werden. Durch technologiespezifische Mindesteffizienzvorgaben ließe sich verhindern, dass wirtschaftliche Effizienzpotenziale aufgrund von Wechselwirkungen zwischen verschiedenen Antriebsarten nicht erschlossen werden. Separate Mindesteffizienzziele sollten dabei insbesondere für konventionelle Antriebe mit Verbrennungsmotor gesetzt werden, da diese Antriebe den höchsten spezifischen Energieverbrauch und CO_2-Ausstoß aufweisen und da sie voraussichtlich noch für einige Jahre die Neuwagenflotten dominieren werden. Zudem sind ihre wirtschaftlichen Effizienzpotenziale am besten untersucht.

Parallel implementierte Flottengrenzwerte für den Endenergieverbrauch reizen gleichzeitig Effizienzverbesserungen für alle Antriebsarten an und stimulieren überdies die Nachfrage nach elektrischen Antrieben. Letztlich sollte die Förderung alternativer Antriebstechnologien allerdings nicht primär über Grenzwerte erfolgen. Hierfür können andere Instrumente der Technologieförderung zielgerichteter und auch ökonomisch effizienter eingesetzt werden (vgl. Kap. 5.2 und 5.4). Grenzwerte sollten vornehmlich der – auch inkrementellen – Verbesserung der Fahrzeugeffizienz dienen. In der Abwägung aller Vor- und Nachteile der verschiedenen Regulierungsoptionen spricht sich der SRU dafür aus, eine solche duale Effizienzregulierung aus Flottengrenzwerten für den durchschnittlichen Endenergieverbrauch und antriebstechnologiespezifischen Mindesteffizienzvorgaben einzuführen.

Abkehr von gewichtsbasierten Grenzwerten

241. Neben einer Anpassung der verwendeten Metrik sollte auch die Methode für die Zuweisung von herstellerspezifischen Zielvorgaben reformiert werden. Bisher werden die Flotteneffizienzziele der Hersteller auf Basis des durchschnittlichen Gewichts ihrer Fahrzeuge fest-

Vorabfassung - wird durch die endgültige Fassung ersetzt.

gelegt, wobei schweren Fahrzeugen höhere Emissionswerte zugestanden werden. Hierdurch werden Anreize für Gewichtsreduktionen massiv unterlaufen, obwohl die Verringerung des Fahrzeuggewichts eine zentrale Option zur Minderung von Emissionen und Energieverbrauch darstellt (MOCK 2011c). Um diese Verzerrung zu beseitigen, sollten die herstellerspezifischen Effizienzvorgaben künftig nicht mehr gewichtsabhängig sein. Sofern weiterhin eine Differenzierung der Effizienzziele zwischen Herstellern angestrebt wird, sollte diese auf Basis eines anderen Fahrzeugattributs vorgenommen werden. Hier böte sich der sogenannte Footprint bzw. die Grundfläche des Fahrzeugs an, die durch die Multiplikation von Spurweite und Radstand berechnet wird. Zum einen ist die Grundfläche ein besserer Indikator für den Nutzen eines Fahrzeugs als sein Gewicht und zum anderen sind hierdurch positive Effekte auf die Verkehrssicherheit zu erwarten. Letzteres ist darauf zurückzuführen, dass mit einer footprintbasierten Regulierung tendenziell größere Knautschzonen und geringe Gewichtsdiskrepanzen zwischen Fahrzeugen angereizt werden (ELMER 2016, S. 252 ff.).

Orientierung am Verbrauch im Realbetrieb

242. Für die klimapolitische Effektivität von Effizienzgrenzwerten ist es zentral, dass sich eine Verschärfung der Zielwerte auch in einer entsprechenden Verminderung von spezifischem Energieverbrauch und CO_2-Ausstoß im Realbetrieb auf der Straße niederschlägt. Dies war zuletzt nicht der Fall. Während die offiziellen, im Prüfzyklus gemessenen spezifischen CO_2-Emissionen in den vergangenen Jahren kontinuierlich gesunken sind, wuchs gleichzeitig die Diskrepanz zwischen Testemissionen und realen Emissionen auf der Straße immer weiter an – auf zuletzt über 40 % (TIETGE et al. 2016). Die Effizienzfortschritte auf dem Prüfstand wurden durch diese wachsende Lücke weitgehend neutralisiert, sodass die Emissionen im Realbetrieb auf der Straße letztlich kaum gesunken sind.

Mit der Einführung eines neuen, repräsentativeren Testverfahrens, der Worldwide Harmonized Light-Duty Vehicles Test Procedure (WLTP), ab September 2017 wird sich die Diskrepanz zwischen Test- und Realemissionen voraussichtlich verringern. Es verbleiben jedoch Spielräume für Optimierungen der Emissionswerte im Testbetrieb, die sich nicht im Realbetrieb niederschlagen (MOCK und GERMAN 2015). Daher sollte nach Auffassung des SRU die Regulierung – analog zur Regulierung der NO_x-Emissionen – dringend um eine Prüfung der Emissionen unter Realbedingungen (Real Driving Emissions – RDE) auf der Straße ergänzt werden (ebd.). Die Realemissionen dürften dann die WLTP-Emissionen nur um einen – eng definierten – Faktor übersteigen, ansonsten drohten Strafen bis zum Zulassungsentzug.

Überdies haben die Skandale um weit überhöhte NO_x- und CO_2-Emissionen gezeigt, dass die Prüf- und Zulassungsverfahren dringend reformbedürftig sind (ebd.). Ein wichtiges strukturelles Problem stellt dabei die finanzielle Abhängigkeit der testenden Institutionen von den Fahrzeugherstellern dar. Sowohl die Unabhängigkeit als auch die Transparenz der Testverfahren ist zu stärken. Zudem sollten Kontrollmechanismen und Durchgriffsrechte auf europäischer Ebene gestärkt werden. Ferner sollten die den Herstellern bei Verstößen drohenden Konsequenzen eine abschreckende Wirkung haben.

Abstimmung von Grenzwerten und Quoten

243. Die aufkommende Diversifizierung bei Antriebstechnologien und Energieversorgung stellt die Effizienzregulierung vor neue Herausforderungen. Wie zuvor dargelegt, schaffen die Unterschiede in der Energiebereitstellungskette neue regulative Wechselwirkungen zwischen den verschiedenen Antriebsarten. Diese Wechselwirkungen variieren mit der gewählten Metrik und müssen bei der Ausgestaltung der Effizienzregulierung berücksichtigt werden. Bei der Festlegung des Ambitionsniveaus zukünftiger Effizienzgrenzwerte sind vor allem die Annahmen bezüglich der Marktentwicklung elektrischer Antriebe von großer Bedeutung. Da elektrische Antriebe sowohl hinsichtlich ihres spezifischen Energieverbrauchs als auch ihres spezifischen CO_2-Ausstoßes effizienter sind, lässt sich ein gegebenes Ziel für die durchschnittliche Flotteneffizienz mit hohen Anteilen elektrischer Antriebe leichter erreichen. Dies bedeutet auch, dass die effektiven Zielwerte für konventionelle Antriebe aufgeweicht werden, wenn der Flottenanteil elektrischer Antriebe höher ist als bei der Zielwertformulierung erwartet – wobei dieser Effekt durch antriebstechnologiespezifische Mindesteffizienzvorgaben begrenzt werden könnte. Dieser Zusammenhang gilt insbesondere für Auspuff-CO_2-Emissionen und den Endenergieverbrauch als Effizienzmetrik.

Hierdurch wäre die Realisierung wirtschaftlich erschließbarer Effizienzpotenziale – insbesondere im konventionellen Fahrzeugbestand – gefährdet. Es ist daher nicht nur auf eine robuste Ausgestaltung der Effizienzregulierung zu achten, sondern auch auf deren enge Abstimmung mit europäischen und/oder nationalen Quotenvorgaben für alternative Antriebe. Bei der Zielwertformulierung für Effizienzvorgaben muss die – den durchschnittlichen Energieverbrauch und CO_2-Ausstoß senkende – Wirkung

Vorabfassung - wird durch die endgültige Fassung ersetzt.

des über die Quote vorgeschriebenen Marktanteils alternativer Antriebe zwingend berücksichtigt werden.

Ansonsten drohen nicht nur ökologische Ziele verfehlt zu werden, auch könnten den Verbraucherinnen und Verbrauchern Kosteneinsparungen entgehen. Verbesserungen der spezifischen Fahrzeugeffizienz kommen nicht nur der Umwelt zugute, sie zahlen sich in der Regel letztlich ebenfalls für die Fahrzeughaltenden aufgrund der geringeren Energiekosten in finanzieller Hinsicht aus. Zu diesem Schluss kommen auch die Impact Assessments für die Pkw-Effizienzregulierung in den USA und der EU, deren Ergebnisse zur Wirtschaftlichkeit – aus Nutzerperspektive – der Effizienzgrenzwerte vor allem auf Verbesserungen bei konventionellen Antriebstechnologien basieren.

5.3.1.2 Grenzwerte für schwere Nutzfahrzeuge

244. Für schwere Nutzfahrzeuge des Straßengüterverkehrs existieren in der EU bisher keine CO_2-Grenzwerte – anders als in den USA, Kanada, China und Japan. Es laufen allerdings bereits Vorarbeiten auf EU-Ebene, die in eine verbindliche Effizienzregulierung überführt werden könnten. Hervorzuheben ist hier die Entwicklung des Simulationsverfahrens VECTO (Vehicle Energy Consumption Calculation Tool) (ICCT 2017a), das zur Berechnung des spezifischen Kraftstoffverbrauchs und CO_2-Ausstoßes von Lkw und Sattelkraftfahrzeugen entwickelt wurde. Diese Informationen sind eine notwendige, bisher aber fehlende Voraussetzung für die Regulierung der Effizienz von schweren Nutzfahrzeugen.

Die Bundesregierung sollte sich für eine schnelle und ambitionierte Einführung von Effizienzgrenzwerten einsetzen. Spätestens zum Jahr 2025 sollten die Effizienzvorgaben für schwere Nutzfahrzeuge greifen. Aufgrund der vergleichsweise schnellen Flottenerneuerung schwerer Nutzfahrzeuge ließe sich durch anspruchsvolle CO_2- bzw. Energieverbrauchsgrenzwerte relativ kurzfristig die CO_2-Belastung je beförderter Tonne spürbar mindern. Im Jahr 2025 eingeführte Grenzwerte könnten somit bereits einen substanziellen Beitrag dazu leisten, die Klimaziele des Verkehrssektors für das Jahr 2030 zu erreichen.

Derzeit basiert der Straßengüterverkehr nahezu ausschließlich auf Dieselantrieben. Zukünftig ist jedoch mit einer zunehmenden Diversifizierung des Antriebsportfolios auch bei schweren Nutzfahrzeugen zu rechnen. Daher stellen sich hinsichtlich der anzuwendenden Effizienzmetrik ähnliche Fragen wie im Segment der Pkw und leichten Nutzfahrzeuge. Perspektivisch (d. h. ab dem Jahr 2030) erachtet der SRU auch für das Lkw-Segment eine duale Effizienzregulierung aus antriebsspezifischen Mindesteffizienzvorgaben und Flottengrenzwerten für den Endenergieverbrauch als sinnvoll.

Für eine effektive Ausgestaltung ist es wichtig, dass der Regulierungsansatz nicht nur die Motoreneffizienz, sondern auch die Aufbauten bzw. den gesamten Fahrzeugzug umfasst, da Potenziale zur Verbesserung der Gesamteffizienz schwerer Nutzfahrzeuge vor allem auch im Bereich Aerodynamik, bei der Verringerung des Rollwiderstandes und bei Gewichtseinsparungen liegen. In den USA werden neben der Motoreneffizienz sowohl Sattelzugmaschinen als auch Anhänger – allerdings separat – reguliert (SHARPE et al. 2014; ICCT 2017b). Die Berechnungen mit VECTO legen bisher hingegen für Anhänger und Boxen Standardmaße zugrunde.

245. Trotz der vorhandenen substanziellen Effizienzpotenziale hat sich der spezifische Kraftstoffverbrauch schwerer Nutzfahrzeuge in den letzten 15 Jahren kaum verändert (MUNCRIEF und SHARPE 2015). Dass die vorhandenen Effizienzpotenziale bisher nur sehr unzureichend genutzt werden, ist – neben anderen Markthemmnissen – unter anderem auch auf mangelnde Transparenz im Markt zurückzuführen (AARNINK et al. 2012; DÜNNEBEIL et al. 2015, S. 123 ff.). Speditionen stehen bislang keine verifizierten Informationen über den Kraftstoffverbrauch verschiedener Fahrzeugoptionen zur Verfügung. Daher sollte nach Ansicht des SRU Speditionen bzw. spezialisierten Dienstleistern, die im Auftrag von Speditionen arbeiten, die Nutzung von VECTO oder eines darauf aufbauenden, öffentlich zugänglichen Simulationstools ermöglicht werden. Dies würde es ihnen erlauben, die Gesamtemissionen bzw. den Gesamtkraftstoffverbrauch eines Fahrzeugzugs für verschiedene Konfigurationen zu berechnen. Damit würde den Speditionen die Anschaffung von verbrauchsarmen und für die jeweilige Nutzung optimierten Fahrzeugen erleichtert (SRU 2012, Tz. 268). Überdies bedarf es einer kontinuierlichen Weiterentwicklung von VECTO. Einige innovative Effizienztechnologien können bisher in VECTO nicht oder nur eingeschränkt abgebildet werden, wodurch nur schwache Anreize bestehen, diese Technologien in Fahrzeugen zu verbauen.

Vorabfassung - wird durch die endgültige Fassung ersetzt.

5.3.2 CO_2- oder energieverbrauchsabhängige Kfz-Steuern und Bonus-Malus-Systeme

246. Neben ordnungsrechtlichen Effizienzvorgaben können auch fiskalische Effizienzanreize gesetzt werden. Hierfür kommen vor allem CO_2- oder energieverbrauchsabhängige Kfz-Steuern bzw. auch sogenannte Bonus-Malus-Systeme infrage. Bei letzterem Regulierungsansatz, der zunehmende Verbreitung findet, wird der Kauf besonders energieeffizienter Fahrzeuge bezuschusst und ineffiziente Fahrzeuge werden zusätzlich belastet (BASTARD 2010; D'HAULTFŒUILLE et al. 2014; KLIER und LINN 2012).

Fiskalische Effizienzanreize können sowohl im Rahmen einmaliger Zahlungen (Kauf- oder Zulassungssteuer bzw. Bonus-Malus-System) als auch periodischer Zahlungen (z. B. jährliche Kfz-Steuer in Deutschland) gesetzt werden. Der Vorteil jährlicher CO_2- oder energieverbrauchsabhängiger Kfz-Steuern besteht darin, dass sie – gegenüber einmaligen Steuern – die Flottenerneuerung beschleunigen, da eine lange Haltedauer von ineffizienten Fahrzeugen mit hohen kumulierten Steuerzahlungen einhergeht. Aufgrund der Möglichkeit einer Gutschrift beim Kauf eines effizienten Fahrzeugs ist der Anreiz für eine lange Fahrzeughaltedauer bei Bonus-Malus-Systemen weniger stark ausgeprägt. Zudem kann ein bei Kauf/Zulassung unmittelbar fälliger und aufgrund der einmaligen Zahlung höherer Steuersatz bzw. Bonus/Malus die Kaufentscheidung der Konsumentinnen und Konsumenten wirksamer in Richtung höherer Fahrzeugeffizienz beeinflussen, da er eine höhere Sichtbarkeit und hierdurch ein größeres Entscheidungsgewicht als periodische Zahlungen aufweist.

247. Die Wirkmechanismen von Effizienzgrenzwerten und fiskalischen Effizienzanreizen, insbesondere Bonus-Malus-Systemen, überlappen sich. Während Bonus-Malus-Systeme den spezifischen Energieverbrauch bzw. Treibhausgasausstoß explizit bepreisen, bringen Flottengrenzwerte ebenfalls eine – jedoch implizite – Bepreisung des spezifischen Energieverbrauchs bzw. Treibhausgasausstoßes mit sich (ROTH 2014; ELMER 2016; GILLINGHAM 2013). Um einen ambitionierten Flottengrenzwert einhalten zu können, werden Fahrzeughersteller besonders effiziente Fahrzeuge firmenintern subventionieren und besonders ineffiziente Fahrzeuge mit einem internen, regulierungsbedingten Kostenzuschlag belegen. Letztlich findet somit eine gewisse gegenseitige regulatorische Neutralisierung der durch Grenzwerte einerseits und Steuern oder Bonus-Malus-Systeme andererseits gesetzten Anreize statt.

Dennoch kann der gleichzeitige Einsatz von fiskalischen Effizienzanreizen und Grenzwerten sinnvoll sein, insbesondere in einem von technologischer Unsicherheit gekennzeichneten Marktumfeld. Verlieren Grenzwerte – aufgrund unerwarteter Marktentwicklungen – ihre effektive Bindungswirkung (d. h. sie können ohne zusätzliche Effizienzanstrengungen erfüllt werden), setzen CO_2- oder energieverbrauchsabhängige Steuern bzw. Bonus-Malus-Systeme dennoch Anreize für weitere Effizienzverbesserungen. Der von ihnen ausgehende Effizienzanreiz ist mithin robuster gegenüber nicht antizipierten technologischen Entwicklungen.

248. Der SRU unterstützt daher eine robuste, hybride Regulierung aus verbindlichen Effizienzgrenzwerten und fiskalischen Anreizen. Dabei spricht sich der SRU für die temporäre Einführung eines beim Fahrzeugkauf ansetzenden Bonus-Malus-Systems sowie die Beibehaltung und Stärkung der CO_2-abhängigen (oder einer energieverbrauchsabhängigen) Kfz-Besteuerung aus. Hierdurch würden die stärkere Sichtbarkeit einer beim Fahrzeugkauf fälligen, vergleichsweise hohen Zahlung und die mit einer jährlichen Besteuerung einhergehenden Anreize zur Flottenerneuerung kombiniert. Die bestehende Kaufprämie für elektrische Fahrzeuge sollte in das Bonus-Malus-System integriert werden. Grundsätzlich denkbar wäre auch eine stärkere Verknüpfung beider Systeme; so könnten in den ersten Jahren fällige Steuerzahlungen mit der Einmalzahlung beim Fahrzeugkauf verrechnet werden. Die Umsetzbarkeit eines solchen kombinierten Modells sollte geprüft werden. Die Subventionierung des Kaufs besonders effizienter Fahrzeuge sollte nur übergangsweise erfolgen und im Wesentlichen als weiterer „Pull" zur Marktdurchdringung alternativer Antriebe dienen. Sobald diese wettbewerbsfähig sind, sollte die Förderung auslaufen. Das Bonus-Malus-System könnte jedoch in eine CO_2- bzw. energieverbrauchsabhängige Zulassungssteuer überführt werden. Der SRU lehnt eine dauerhafte Subventionierung – auch sehr effizienter – Pkw ab. Im Bereich der schweren Nutzfahrzeuge können von einem Bonus-Malus-System – mindestens bis zum Inkrafttreten verbindlicher Effizienzgrenzwerte – ebenfalls wichtige Impulse für die Reduzierung des spezifischen Energieverbrauchs ausgehen.

Vorabfassung - wird durch die endgültige Fassung ersetzt.

5.4 Neue Infrastruktur für einen elektrifizierten Verkehr

249. Die Markteinführung alternativer Antriebe (Elektromobilität i. e. S., Brennstoffzelle) bedarf unterstützender staatlicher Maßnahmen, um eine schnelle und erfolgreiche Markteinführung zu gewährleisten. Zu nennen ist hierbei insbesondere auch die Förderung des Auf- und Ausbaus einer quantitativ wie qualitativ bedarfsgerechten, zukunftsfähigen Lade- bzw. Wasserstofftankinfrastruktur. Einerseits wird die anhaltende Zurückhaltung beim Kauf von Fahrzeugen mit alternativen Antrieben überwiegend mit der noch fehlenden Lade- und Tankinfrastruktur begründet, andererseits bedeuten die nach wie vor geringen Zulassungszahlen von Elektro- und Brennstoffzellenfahrzeugen ein Auslastungsrisiko für potenzielle Lade- bzw. Tankinfrastrukturbetreiber (Henne-Ei-Problem) (BMVI 2017a).

5.4.1 Ladeinfrastruktur für Elektrofahrzeuge

250. Ende 2015 waren in Deutschland insgesamt 5.836 Ladepunkte an 2.567 Ladestationen öffentlich zugänglich; davon waren nur rund 350 Schnellladestationen (BMVI 2016c). Die im Februar 2017 veröffentlichte Förderrichtlinie des Bundesministeriums für Verkehr und digitale Infrastruktur (BMVI) zielte dementsprechend vorrangig auf öffentlich zugängliche Schnellladeinfrastruktur ab. In der Förderperiode 2017 bis 2020 werden 300 Mio. Euro für die Einrichtung von Schnellladepunkten ausgeschrieben. Hierbei werden max. 60 % Zuschuss und bis höchstens 12.000 Euro Fördersumme für Ladepunkte kleiner als 100 kW bzw. bis höchstens 30.000 Euro Fördersumme für Ladepunkte ab 100 kW bewilligt. Ergänzend werden Netzanschlüsse an das Niederspannungs- bzw. Mittelspannungsnetz gefördert. Das gesamte Förderpaket soll den Aufbau von bundesweit 15.000 öffentlich zugänglichen Ladestationen ermöglichen, davon 5.000 Schnelllade- und 10.000 Normalladestationen (BMVI 2016c).

Im Juni 2017 wurden die ersten circa einhundert Anträge zu dieser Ausschreibung bewilligt. Das BMVI nennt für diese Anträge die Fördersumme von insgesamt 14 Mio. Euro, mit der zusätzlich rund 400 Schnellladepunkte und mehr als 1.400 Normalladepunkte errichtet werden sollen (vgl. BMVI 2017b). Von diesen ersten circa 1.800 Ladepunkten werden 595 Ladepunkte allein in und um Hamburg errichtet. Die bisher veröffentlichten Daten deuten auf zwei Schwächen des Ausschreibungsverfahrens hin. Zum einen werden überwiegend Normalladepunkte gefördert, obwohl die Errichtung von Schnellladeinfrastruktur dringender geboten wäre, um Fernverkehrsoptionen für Elektromobilität zu ermöglichen. Zum anderen erscheint die geographische Verteilung, die für eine angemessene Flächendeckung der Versorgung wichtig wäre, recht willkürlich und ungeplant; die Förderung erfolgte vor allem nach Antragseingang (vgl. auch die Liste der veröffentlichten Förderbescheide: BMVI 2017b). Eine stärkere Fokussierung von förderfähiger (Schnell-) Ladeinfrastruktur auf die Hauptverkehrsachsen erscheint hier geboten. Positiv zu erwähnen ist in diesem Zusammenhang der Plan der Autobahn Tank & Rast GmbH, die den größten Teil der deutschen Autobahnraststätten bewirtschaftet, in Kooperation mit dem BMVI und lokalen Stromversorgern rund 400 ihrer Standorte bis möglichst Ende 2017 mit Schnellladesäulen auszurüsten. Die Kosten für die Errichtung der Schnellladesäulen und der notwendigen technischen Infrastruktur tragen BMVI und die Tank & Rast GmbH anteilig, die laufenden Betriebskosten sowie Kosten für Wartung, Instandhaltung und Erneuerung trägt die Tank & Rast GmbH. Das BMVI stellt insgesamt circa 9 Mio. Euro Haushaltsmittel für die Ausstattung aller rund 430 bewirtschafteten Rastanlagen für drei Jahre (2015–2017) bereit (Deutscher Bundestag 2015).

251. Ausgehend von den bisherigen Gewohnheiten beim Tanken von flüssigen Kraftstoffen erwarten die Nutzenden die Möglichkeit, ohne großen Komfort- und Zeitverlust auch Elektrofahrzeuge laden zu können (BMVI 2016c). Insbesondere für eine erfolgreiche Einführung von rein batterieelektrischen Fahrzeugen ist ein rascher Aufbau eines Schnellladenetzwerks auf Basis der Gleichstromladetechnologie also zeitnah erforderlich, das in ein Ladeinfrastruktur-Angebotskonzept eingebettet sein sollte. Durch ein solches Netzwerk werden auch Mobilitätsoptionen für den Fernverkehr geschaffen, weshalb es bedeutsam ist, ein flächendeckendes Netz aufzubauen. Der durch das Ladeinfrastrukturnetz generierte Nutzen wird nicht nur durch die Menge und Standorte der Ladestationen, sondern auch durch weitere Parameter des Angebotskonzepts, insbesondere durch das Preissystem und die Nutzungsregeln, beeinflusst. Dieses Angebotskonzept sollte möglichst wenig komplex ausgelegt sein (BECKERS et al. 2015).

Vorabfassung - wird durch die endgültige Fassung ersetzt.

Auch die europäische Richtlinie 2014/94/EU über den Aufbau der Infrastruktur für alternative Kraftstoffe verpflichtet die Mitgliedstaaten auf der Grundlage des jeweiligen nationalen Strategierahmens zu einem flächendeckenden und ausgewogenen Aufbau von Ladeinfrastruktur. Auf Grundlage verschiedener Studien ging die Bundesregierung 2016 davon aus, dass bis zum Jahr 2020 für die Elektromobilität mit einer Million angestrebten Elektrofahrzeugen 36.000 Ladepunkte zur Normalladung und 7.000 Ladepunkte zur Schnellladung benötigt werden (BMVI 2016c). Aus dieser Bedarfsschätzung wurde das Ziel der Bundesregierung abgeleitet, in der Legislaturperiode 2017 bis 2021 ein flächendeckendes Netz von 50.000 Ladepunkten zu errichten (vgl. BMVI 2017, S. 5).

Im Projekt Laden2020, das eine der Grundlagen für die Mengenziele der Bundesregierung hinsichtlich Ladepunkten darstellt, wurden auch Sensitivitätsrechnungen zur Reichweite, zur Flottenverteilung zwischen rein batterieelektrischen und Hybridfahrzeugen und verschiedenen Ladeperspektiven angestellt und ein Literaturreview durchgeführt. Je nach zugrunde gelegten Annahmen ist die Bandbreite der Zahl notwendiger öffentlicher Ladepunkte sehr groß, sie kann auch eine Größenordnung von etwa 100.000 Ladepunkten für eine Million Elektrofahrzeuge erreichen (ANDERSON et al. 2016a, S. 24). Deshalb sollte die Anzahl der Elektrofahrzeuge, ihre realen Fahrprofile und ihre Reichweiten sowie die Zusammensetzung der Flotte regelmäßig überprüft werden, um die Bedarfsschätzungen für die Ladeinfrastruktur anzupassen.

252. Mit der Ladesäulenverordnung wurden im März 2016 Vorgaben der Richtlinie 2014/94/EU für technische Standards von Ladestecksystemen an öffentlich zugänglichen Ladepunkten in deutsches Recht umgesetzt. Sie ist eine wichtige Voraussetzung für eine bundesweit koordinierte Markteinführung von Elektromobilität. Die Verordnung enthält auch Prüf- und Meldepflichten für die Betreiber öffentlich zugänglicher Ladeinfrastruktur sowie Befugnisse für die Bundesnetzagentur.

253. Bisher sind Verträge der Nutzenden mit Ladesäulenbetreibern wie lokalen Energieversorgern üblich (Fahrstromvertrag). Diese beinhalten zwar eRoaming-Optionen zum Laden an Ladepunkten anderer Anbietender, allerdings gilt diese Option nur innerhalb bestimmter Verbünde und ist zumeist erheblich teurer als das Laden an den Stationen des Vertragspartners. Abhängig vom eRoaming-Anbietenden und der Tarifgestaltung können die Betriebskosten pro 100 km teils deutlich über die von vergleichbaren Verbrennungsfahrzeugen ansteigen (VOGT und FELS 2017, S. 52). Analog zum Mobilfunksektor scheint hier ein regulatorischer Eingriff des Staates zur Vermeidung überhöhter eRoaming-Gebühren geboten. Auch weitergehende Maßnahmen, die zu einem aus Kundensicht unkompliziert nutzbarem und nicht durch Marktmachteffekte verteuertem Angebot führen, sollten in Erwägung gezogen werden.

Eine aktuelle Umfrage unter Elektromobilitätsnutzern und Interessenten zeigt, dass es bisher noch zu kompliziert ist, sich an Ladesäulen zu registrieren, zu authentifizieren und dort zu bezahlen. Das betrifft neben dem Wunsch nach diskriminierungsfreiem eRoaming die bislang mangelnde Verfügbarkeit gängiger Ad-hoc-Zahlungsverfahren sowie die komplexe Authentifizierung der Nutzenden. Ferner werden von den (potenziellen) Nutzenden die Intransparenz von Kosten und Tarifmodellen bemängelt (VOGT und FELS 2017, S. 41).

Mit der zum 1. Juni 2017 in Kraft getretenen Novellierung der Ladesäulenverordnung wurden zusätzliche Mindestanforderungen an Zugangsregeln für Ladepunkte definiert. Insbesondere sind für neu zu errichtende Ladepunkte auch Direktzahlungsmöglichkeiten ohne Authentifizierung der Nutzenden vorgeschrieben. Diese sollen sicherstellen, dass alle Nutzenden spontan, das heißt auch ohne Fahrstromvertrag, nachladen können (BMVI 2016c). Grundsätzlich ist diese Regelung positiv zu beurteilen. Es ist jedoch zu prüfen, ob die Entwicklung des Preisgefüges für Direktzahlende im Vergleich zu der für Vertragskunden nicht zusätzlich eine geeignete Preisregulierung erfordert, und ob unter Umständen weitere staatliche Maßnahmen zur Standardisierung von Prozessen um den Ladevorgang notwendig sind.

254. Gerade für den Fernverkehr sind Informationen über die aktuelle Verfügbarkeit von Ladeinfrastruktur von entscheidender Bedeutung. Die notwendigen Basisinformationen umfassen etwa Angaben zum genauen Standort, etwaige Beschränkungen, die Öffnungszeiten, mögliche Authentifizierungsoptionen, den Betreiber, die Tarife, kompatible Steckertypen und -anzahl, die Ladeleistungen sowie gegebenenfalls die aktuelle Belegung der Ladepunkte (VOGT und FELS 2017, S. 41). Bisher fehlt ein zentrales Register für diese wichtigen Informationen. Analog zur Markttransparenzstelle für Kraftstoffe sollte künftig eine solche Datenbank allen Nutzenden und Serviceanbietern (z. B. Unternehmen, die Apps entwickeln oder Navigationsgeräte herstellen) zur Verfügung gestellt werden.

Vorabfassung - wird durch die endgültige Fassung ersetzt.

Während der Aufbau eines flächendeckenden, öffentlich zugänglichen Schnellladesystems vor allem der Schaffung von Fernverkehrsoptionen für Elektromobilität dient, werden geschätzte 85 % aller Ladevorgänge im privaten Bereich stattfinden (NPE 2016). Hier sind vergleichsweise lange Ladedauern wegen entsprechender Standzeiten der Fahrzeuge unproblematisch. Die gegenwärtigen rechtlichen Rahmenbedingungen erschweren Mietern und Gemeinschaftseigentümern von Wohnraum jedoch den Einbau von Ladestellen für Elektrofahrzeuge an ihrem privaten Kfz-Stellplatz. Um den Auf- und Ausbau privater Ladepunkte zu fördern, sind deshalb Anpassungen im Bau-, Wohneigentums- und Mietrecht notwendig; ein entsprechender Gesetzentwurf des Bundesrates liegt vor (vgl. Bundesrat 2016). Zu Beginn dieser Legislaturperiode soll dieser Entwurf zur erleichterten Durchführung von baulichen Veränderungen zur Schaffung von Ladeinfrastruktur wieder aufgenommen und ein Vorschlag zu Gesetzesänderungen vorgelegt werden (ebd., S. 19; Deutscher Bundestag 2017).

255. Zentral ist, dass die Ausbau- und Förderstrategie für die Ladeinfrastruktur eng mit dem weiteren Instrumentarium zur Förderung der Elektromobilität koordiniert wird. Dies gilt insbesondere für die vom SRU empfohlene Quote für alternative Antriebe (s. Tz. 229 ff.). Damit der „Push" für die Elektromobilität durch eine solche Quote seine volle Wirksamkeit entfalten kann, ist ein konsistenter „Pull" in Form eines ausreichenden Infrastrukturangebots notwendig. Die Einführung und kontinuierliche Erhöhung der Quote muss daher mit der Verfügbarkeit der für den entsprechenden Flottenanteil benötigten Infrastruktur einhergehen. Um dies zu gewährleisten, sollte die Entwicklung des Infrastrukturausbaus regelmäßig überprüft werden und bei Fehlentwicklungen steuernd und unterstützend eingegriffen werden.

256. Im Ergebnis bleibt festzuhalten, dass der Bund den Ausbau der Ladeinfrastruktur für Elektrofahrzeuge zumindest vorübergehend massiv staatlich fördern sollte. Dafür muss das Programm des Bundes, das 300 Mio. Euro in der Förderperiode 2017 bis 2020 bereitstellt, fortgeführt und ausgebaut werden. Wie lange und in welchem Ausmaß eine staatliche Förderung des Auf- und Ausbaus der Ladeinfrastruktur notwendig sein wird, lässt sich derzeit noch nicht genau abschätzen. Auch ist es möglich, dass die Wirtschaftlichkeitsschwelle der Bereitstellung von Ladeinfrastruktur nicht in allen Regionen zeitgleich erreicht werden wird, beispielsweise aufgrund unterschiedlich dichter Siedlungsstrukturen. Dies kann einen räumlich differenzierten Förderansatz erforderlich machen, um eine flächendeckend ausreichende Infrastruktur zu gewährleisten. Auch angesichts dieser Unsicherheiten ist eine regelmäßige Re-Evaluierung der Förderstrategie geboten. Es müssen auf EU-Ebene überdies bindende Vorgaben für die Bereitstellung von Ladeinfrastrukturen bei Neubauten gemacht werden. Zudem sollten auch private Arbeitgeber verpflichtet werden, Ladeinfrastruktur auf ihren Firmenparkplätzen bereitzustellen.

5.4.2 Oberleitungsinfrastruktur für schwere Nutzfahrzeuge

257. Im Fernverkehr mit schweren Lkw (> 12 t zGG), der für circa 80 % der CO_2-Emissionen im Straßengüterverkehr verantwortlich ist, kommen nach derzeitigem und absehbarem Stand der Technik batterieelektrische Fahrzeuge nicht infrage. Das sehr hohe Volumen und Gewicht der mitzuführenden Batterien steht derem Einsatz im Wege. Um dennoch die Wirkungsgradvorzüge der direkten Elektrifizierung zu nutzen, können schwere Nutzfahrzeuge über Oberleitungen mit elektrischem Strom versorgt werden. Diese Antriebsform weist deutliche Wirkungsgradvorteile gegenüber der Nutzung von Wasserstoff und insbesondere von synthetischen Kraftstoffen auf (vgl. Tz. 111 ff. und 169 ff.).

Elektrifizierung der Autobahnen

258. In verschiedenen Studien wurden die technische Machbarkeit, die Wirtschaftlichkeit und die ökologischen Wirkungen einer Elektrifizierung mittels Oberleitungen untersucht (z. B. WIETSCHEL et al. 2017a). Im Ergebnis wird dieser Option regelmäßig sowohl die technische Realisierbarkeit, ein substanzieller Beitrag zur Dekarbonisierung des Güterverkehrs sowie wirtschaftliche Konkurrenzfähigkeit mit anderen Dekarbonisierungsoptionen beschieden.

Grundsätzlich müssten nur Teile des Autobahnnetzes mit Oberleitungen ausgestattet werden. Aufgrund der Konzentration großer Teile des Güterfernverkehrs auf einigen zentralen Routen kann bereits durch die Elektrifizierung eines Drittels des deutschen Autobahnnetzes (d. h. ca. 4.000 km) ein elektrischer Fahranteil von circa 60 % erreicht werden (WIETSCHEL et al. 2017a). Die hiermit erzielbare jährliche Emissionseinsparung läge bei 10 bis 12 Mio. t CO_2 (bezogen auf die Nutzungsphase und bei Verwendung erneuerbarer Energien). Die erforderlichen Investitionen für den Aufbau der Infrastruktur belaufen sich auf geschätzte 8 bis 10 Mrd. Euro und wären damit nicht viel höher als die jährlichen Steuerausfälle

Vorabfassung - wird durch die endgültige Fassung ersetzt.

durch die Dieselprivilegierung. Durch die Zwischenspeicherung von Strom in mittelgroßen, gut mitzuführenden Batterien im Fahrzeug ließe sich die benötigte Länge der mit Oberleitungen ausgestatteten Autobahnabschnitte weiter verringern.

259. Um die Tragfähigkeit eines Straßengüterverkehrskonzepts auf Basis von Oberleitungs-Lkw auch in der Praxis zu untersuchen, wurden 2017 – neben Demonstrationsprojekten in anderen Ländern – Tests auf zwei deutschen Autobahnabschnitten vorbereitet. Diese sollten energisch vorangetrieben, wissenschaftlich eng begleitet und schnell ausgewertet werden. Bei erfolgreicher Erprobung des Ansatzes, und falls sich bis dahin keine klaren Fortschritte bei alternativen technologischen Optionen abzeichnen, sollten schnell Konzepte entwickelt werden, um die oberleitungsbasierte Elektrifizierung des Güterschwerverkehrs in größerem Maßstab umzusetzen. So müssen dann unverzüglich die planungsrechtlichen Voraussetzungen für den Infrastrukturaufbau geschaffen und Finanzierungskonzepte erarbeitet werden. Wegen des schnellen Aufzehrens des verbleibenden deutschen Emissionsbudgets, insbesondere des Budgets des Verkehrssektors, kann nicht mehr lange mit dem Einleiten ambitionierter Maßnahmen im Güterschwerverkehr gewartet werden.

Bereits in seinem Umweltgutachten 2012 hat der SRU empfohlen, dass der Bund die Einführung von Oberleitungs-Lkw dadurch fördert, dass er die Elektrifizierung wesentlicher Trassen plant und finanziert (SRU 2012, Tz. 285). Die Finanzierung der Infrastruktur könnte beispielsweise über die Lkw-Maut erfolgen. Als Teil der Autobahninfrastruktur würden die Oberleitungen in den Wegekosten miterfasst. Der entsprechende Anteil an der Maut würde von allen schweren Nutzfahrzeugen zu entrichten sein, da ihnen die Option zur Nutzung der Oberleitungen grundsätzlich offen steht. Durch ein solches Finanzierungskonzept würde auch der wirtschaftliche Anreiz steigen, auf direkt-elektrische Fahrzeuge umzusteigen.

260. Im Sinne einer möglichst raschen und gleichzeitig effektiven Marktdurchdringung des direkt-elektrischen Straßengüterverkehrs sollten zunächst wichtige Pendelstrecken bzw. mit geeigneten Start-Ziel-Relationen hochfrequentierte Autobahnabschnitte mit einer Oberleitungsinfrastruktur ausgerüstet werden. Die Elektrifizierung des deutschen Autobahnnetzes könnte dabei als Keimzelle für eine europäische Lösung fungieren. Die Bundesregierung sollte sich aber auch politisch aktiv für die Expansion des Konzepts einsetzen, beispielsweise durch gemeinsame Planungen und die Vereinbarung gemeinsamer technischer Standards.

Infrastrukturaufbau und Markteinführungsförderung

261. Neben dem Aufbau der Energieversorgungsinfrastruktur sollten während der Markteinführungsphase auch weitere Anreizinstrumente zum Einsatz kommen, die den Umstieg auf direkt-elektrische Nutzfahrzeuge unterstützen. Die Einführung von CO_2-Grenzwerten bzw. Energieverbrauchsgrenzwerten für schwere Nutzfahrzeuge (vgl. Tz. 244 ff.) würde einen gewissen herstellerseitigen Anreiz zur Vermarktung von Oberleitungs-Lkw schaffen. Dieser würde jedoch voraussichtlich nicht ausreichen, um die gerade anfangs deutlich höheren Anschaffungskosten zu kompensieren. Gleiches gilt auch für eine stärkere Ökologisierung der Lkw-Maut sowie des Systems der energiebezogenen Steuern und Abgaben (vgl. Tz. 207 ff. und 279 ff.). Daher könnten staatliche Kaufprämien anfangs eine sinnvolle Ergänzung des Instrumentenmixes sein, um Spediteure zur Anschaffung von Oberleitungs-Lkw zu bewegen.

262. Gerade in der Infrastrukturaufbau- und Markteinführungsphase könnten Speditionen mit der Anschaffung von Oberleitungs-Lkw zögern, da Erfahrungen mit der Technologie fehlen und das elektrifizierte Streckennetz noch klein ist. Um auf den bereits elektrifizierten Streckenabschnitten dennoch die Auslastung der Infrastruktur zu erhöhen, könnten möglicherweise sogenannte Traktionsdienstleistungsunternehmen zum Einsatz kommen (WIETSCHEL et al. 2017a). Diese Unternehmen würden mit eigenen direkt-elektrischen Sattelzugmaschinen Auflieger und Anhänger im Auftrag von Speditionen auf längeren, bereits elektrifizierten Trassen befördern. Durch die hohe Auslastung der Fahrzeuge der Traktionsdienstleistungsunternehmen ließen sich deren höhere Anschaffungskosten schneller amortisieren. Die niedrigeren Energiekosten (und Mautsätze) der elektrischen Fahrzeuge würden grundsätzlich Spielräume für solche Geschäftsmodelle eröffnen. Es sollte zunächst geprüft werden, inwieweit solche Modelle tatsächlich technisch, organisatorisch und wirtschaftlich umsetzbar sind. Bei positiver Evaluation könnten in einem zweiten Schritt Förderinstrumente entwickelt werden, beispielsweise temporäre Subventionen zur Markteinführung und Unterstützung beim Aufbau der benötigten Umladestationen.

263. Strecken abseits des elektrifizierten (deutschen) Autobahnnetzes können entweder über Batterien mit begrenzter Reichweite oder mittels Hybridkonzepten (ergänzender Verbrennungsmotor bzw. Brennstoffzelle) zu-

Vorabfassung - wird durch die endgültige Fassung ersetzt.

rückgelegt werden. Welche Technologie sich für die Erhöhung der Reichweite langfristig als vorzugswürdig erweist (Batterie, Brennstoffzelle, Verbrennungsmotor mit synthetischen Kraftstoffen), ist derzeit noch nicht klar und überdies vom Einsatzprofil des Fahrzeugs abhängig, weshalb hier eine breit gefächerte Förderpolitik geboten scheint.

5.4.3 Wasserstoffinfrastruktur

264. Analog zur Ladeinfrastruktur für Elektrofahrzeuge ist für eine erfolgreiche Markteinführung von Brennstoffzellenfahrzeugen ein flächendeckendes Tankstellennetz für Wasserstoff nötig. Würde sich der Einsatz von Wasserstoff vor allem auf den Güterfernverkehr beschränken, wäre ein weniger dichtes Netz notwendig als im Falle einer verbreiteten Anwendung der Technologie im Pkw-Segment. Im Juni 2016 waren 21 Wasserstofftankstellen mit der Standard-Betankungstechnologie von 700 bar für Pkw in Deutschland in Betrieb. Bis Ende 2016 sollten circa 50 Tankstellen verfügbar sein. Ein Industrie-Joint-Venture plant bis 2019/2020 eine Basisabdeckung Deutschlands mit circa 100 Wasserstofftankstellen. Damit soll das Kernnetz der transeuropäischen Verkehrswege abgedeckt und europaweite Mobilität mit Brennstoffzellen-Pkw ermöglicht werden. Danach soll der weitere Ausbau in Abhängigkeit der Entwicklung des tatsächlichen Fahrzeugbestandes erfolgen, sodass bis zum Jahr 2025 deutschlandweit insgesamt bis zu 400 Tankstellen verfügbar wären (BMVI 2016c).

Im Sinne einer technologieoffenen Strategie zur Transformation des Verkehrssektors, nicht zu verwechseln mit Technologieneutralität (vgl. Tz. 225 ff.), sollte auch der Auf- und Ausbau einer Wasserstoffinfrastruktur temporär staatlich gefördert werden. Angesichts der unterschiedlichen Entwicklungsstadien von batterieelektrischen und Brennstoffzellenfahrzeugen sowie der Wirkungsgradvorteile direkt-elektrischer Antriebe sollte der Förderfokus jedoch (zunächst) auf den Ausbau einer Ladeinfrastruktur und – bei erfolgreicher Erprobung – den Aufbau einer Oberleitungsinfrastruktur gerichtet werden. Dennoch sollte die aufzubauende Wasserstoffinfrastruktur hinreichend dicht sein, um die Wasserstoffmobilität weiterentwickeln und praktisch erproben zu können.

5.5 Rohstoffbezug und Kreislaufführung

265. Durch den Umbau des Verkehrssektors hin zu einer CO_2-neutralen Mobilität mit besonderer Relevanz der Elektromobilität im Straßenverkehr kommt es zu einem veränderten Bedarf an Art und Menge der eingesetzten Rohstoffe. Das betrifft nicht nur den Rohstoffbedarf zum Aufbau des Fahrzeugbestandes sowie der benötigten Infrastruktur, sondern auch deren langfristige Erhaltung. Gleichzeitig wächst das Bedürfnis nach Mobilität weltweit, sodass die vorgesehenen Konzepte immer auch auf ihre globale Übertragbarkeit und die Verantwortung für kommende Generationen hin zu betrachten sind.

Die Umweltwirkungen des elektromobilen Verkehrs sind gegenüber dem bisherigen fossilen Antriebskonzept in der Nutzungsphase zum Teil deutlich niedriger (u. a. CO_2, NO_x, Lärm, Feinstaub; s. Abschn. 4.2.5). In der Vorkette – Rohstoffförderung und -aufbereitung – verschieben sich die Umweltwirkungen, da zwar kein Erdöl für den Betrieb der Fahrzeuge mehr benötigt wird, aber andere Rohstoffe für die Motor- und Batterietechnik sowie für die Erzeugung erneuerbaren Stroms notwendig sind (s. Tz. 144). Für die Produktion der Fahrzeuge und den Bau der notwendigen Infrastruktur (Ladeinfrastruktur und die zugrundeliegende regenerative Stromerzeugung) werden Lithium, Seltene Erden, Kobalt, Platin und Kupfer benötigt, die bisher nicht in diesem Ausmaß verwendet wurden. Insofern entstehen durch Abbau und Aufbereitung dieser benötigten Rohstoffe insbesondere auf lokaler und regionaler Ebene neue Umweltwirkungen (u. a. Eingriffe in die Natur, Versauerung, Emission von Feinstaub und anderen Schadstoffen, Ablagerungen). Viele der Rohstoffe kommen nur außerhalb Deutschlands oder der EU vor (UBA 2016b), sodass die negativen Wirkungen dorthin verlagert werden. Da das Ziel eine absolute Reduktion von Schäden ist (Einhaltung der planetaren Grenzen), wird eine solche Verlagerung der Umweltschäden und -kosten der Verantwortung für die Vorketten des inländischen Konsums nicht gerecht. Dies ist auch vor dem Hintergrund zu betrachten, dass der Bedarf an Rohstoffen für höhere Lebensstandards weltweit steigen wird. Außerdem gilt es – in Deutschland wie auch global – Rohstoffe auch für kommende Generationen zu bewahren.

In den meisten politischen Plänen und Programmen (insb. Klimaschutzplan 2050, Nationaler Entwicklungsplan Elektromobilität, Ressourceneffizienzprogramm, EU-Kreislaufwirtschaftspaket, Integriertes Umweltprogramm 2030) fehlt derzeit noch eine enge inhaltliche

Vorabfassung - wird durch die endgültige Fassung ersetzt.

Verzahnung der Zielrichtung Klimaschutz mit der Rohstoff- und Kreislaufwirtschaft. Auch beziehen sich die Programme und Pläne vornehmlich auf inländische und nicht auf in anderen Weltregionen umzusetzende Maßnahmen.

266. Für die Entsorgung am Ende der Nutzungsdauer bestehen für die in Fahrzeugen verbauten Stoffe und Materialien bereits Anforderungen gemäß der Altfahrzeug-Verordnung sowie für die Batterien nach dem Batteriegesetz. Beide Regelungen setzen die auf europäischer Ebene festgeschriebenen Anforderungen aus der Altfahrzeug-Richtlinie 2000/53/EG und der Batterie-Richtlinie 2006/66/EG um. Mit Blick auf Elektromobilität stellen sich jedoch neue Herausforderungen, die in einer Revision berücksichtigt werden müssen:

- Die Zusammensetzung von Fahrzeugen mit nichtfossilem Antrieb unterscheidet sich deutlich von denen mit konventionellem Antrieb.
- Die Verwertungsquoten sind gewichtsbezogen und verkennen ökologisch wie wirtschaftlich die Bedeutung der Rohstoffe wie Zinn, Gold, Silber, Platingruppenmetalle, Tantal, Niob und Lithium.
- Die Verwertung der Stoffe und Materialien geht oftmals mit einem Downcycling einher (z. B. durch Vermischung verschiedener Stahlsorten oder Kupferverschleppungen in die Stahlfraktion); weiterhin zählen abfallwirtschaftliche Maßnahmen, wie zum Beispiel Bergversatz von Fahrzeugglas, als Recycling.
- Nur ein Teil der Fahrzeuge wird innerhalb Deutschlands oder der EU entsorgt. Die Weiternutzung von Elektrofahrzeugen in importierenden Ländern ist mittelfristig aufgrund der begrenzten Infrastruktur für diese Antriebstechnik voraussichtlich sehr eingeschränkt. Es besteht die Gefahr, dass „E-Pkw-Friedhöfe“ in Ländern mit unzureichenden Recyclingstrukturen entstehen. Dieses Risiko besteht vor allem für Hybridfahrzeuge, die mit dem Verbrennungsmotor auch in Ländern ohne Ladeinfrastruktur gefahren werden können.
- Die Anforderungen der Altfahrzeug-Verordnung gelten für Fahrzeuge zur Personenbeförderung bis acht Sitzplätze und Fahrzeuge zur Güterbeförderung bis zu einem Höchstgewicht von 3,5 t, nicht jedoch für schwere Nutzfahrzeuge mit einem Höchstgewicht > 3,5 t und Motorroller.

Mit dem klimaschutzbedingten Technologiewechsel im Verkehrssektor müssen auch die Anforderungen, die für die verwendeten Materialien über den Lebensweg bestehen, überprüft und im Sinne einer Verantwortung, welche über den gesamten Lebenszyklus reicht, weiterentwickelt werden. So sollte der Bezug der Rohstoffe im Ausland mit so geringen Umweltwirkungen wie möglich verbunden sein. Mit der Marktdurchdringung der Elektromobilität werden die in den Fahrzeugen und der zugehörigen Infrastruktur verbauten Rohstoffe Teil des sogenannten anthropogenen Lagers. Mit Blick auf eine Reduzierung der Primärrohstoffentnahme sowie die mit der Rohstoffgewinnung und -nutzung verbundenen Umweltwirkungen gilt es, diesen „Lagerbestand“ am Ende der Produktnutzungsdauer wirksamer als bisher zu bewirtschaften und hieraus qualitativ hochwertige Sekundärrohstoffe bereitzustellen. Dafür müssen neue Entsorgungsstrukturen geschaffen werden, die eine echte Kreislaufführung ermöglichen.

267. Um diese Ziele zu erreichen, sind mehrere Bausteine notwendig:

- Die von Deutschland für seinen eigenen Konsum oder für seine Exportwirtschaft ausgehenden Umweltbelastungen als Folge der Rohstoffgewinnung müssen auf ein verträgliches Maß (Einhaltung der planetaren Grenzen) reduziert werden.
- Auf nationaler volkswirtschaftlicher Ebene ist es notwendig, ein Inventar zu schaffen, in dem genau dokumentiert wird, welche Rohstoffe und Materialien in welcher Form wo eingesetzt werden, um die künftige Verfügbarkeit von Sekundärrohstoffen transparent und zugänglich zu dokumentieren.
- Auf Produktebene ist es notwendig, Stoffe, Materialien und Produkte herzustellen, die tatsächlich möglichst vollständig und hochwertig rezyklierbar sind. Diese Eigenschaft ist zu dokumentieren. Erste Voraussetzung dafür ist eine eindeutige Definition des Begriffs „hochwertig“.

Diese Anforderungen sind nicht nur auf den Rohstoffbedarf beschränkt, der im Besonderen durch die Elektromobilität verursacht wird, sondern zielen auf eine zunehmende Kreislaufführung, um den absoluten Verbrauch an Rohstoffen dauerhaft zu senken.

Vorabfassung - wird durch die endgültige Fassung ersetzt.

5.5.1 Etablierung internationaler Umwelt- und Sozialstandards bei der Rohstoffgewinnung

268. Im Rahmen des Ausbaus von Technologien und Infrastruktur für ein klimaneutrales Leben und Wirtschaften in Deutschland und Europa gewinnt die Senkung der mit der Rohstoffgewinnung und -verarbeitung verbundenen Umweltwirkungen aus Sicht des SRU noch einmal an besonderer Bedeutung. Eine treibhausgasneutrale Energieproduktion und Mobilität darf nicht durch massive Umweltschäden in anderen Ländern „eingekauft" werden.

Bereits in ProgRess und ProgRess II sowie im Integrierten Umweltprogramm (IUP) werden die Verantwortung Deutschlands klargestellt und verschiedene Ansätze zur Minimierung der Umweltwirkungen aufgeführt. Nach wie vor fehlt es aber an der konkreten Umsetzung. Dabei ist es notwendig, über nationale und europäische Ansätze hinauszugehen und sich für internationale Abkommen und Vereinbarungen einzusetzen. So sollte sich Deutschland bei der Weiterentwicklung der nationalen und europäischen Rohstoffstrategien mit großem Nachdruck dafür stark machen, ein internationales Rohstoffabkommen abzuschließen (ausführlich in SRU 2012, Kap. 2). Die Umsetzung der darin festgeschriebenen hohen Standards im Bergbau und der Verarbeitung der gewonnenen Erze würde einen relevanten Beitrag zur Wahrung der Lebensgrundlagen und zur Erfüllung der Sustainable Development Goals (SDG) leisten. Dies sollte auch im Interesse der Länder, die Rohstoffe abbauen, liegen. Entscheidend ist jedoch die tatsächliche Realisierung, deren regelmäßige Überprüfung Teil der Vereinbarungen sein muss. Anspruchsvolle Ansätze für Standards wurden beispielsweise vom International Council on Mining and Metals (ICMM), von der Extractive Industries Transparency Initiative (EITI) und der Organisation for Economic Co-operation and Development (OECD) entwickelt (RÜTTINGER et al. 2015a; 2015c; RÜTTINGER und GRIESTOP 2015). Hier werden auch soziale und finanzielle Aspekte berücksichtigt.

Kurzfristig sollten aber auch bilaterale Ansätze verfolgt werden. In diesem Rahmen könnten beispielsweise die von Deutschland geschaffenen Rohstoffpartnerschaften, die bisher eher das Ziel der Versorgungssicherheit verfolgen, um das Ziel der nachhaltigen Gewinnung von Rohstoffen erweitert werden (RÜTTINGER et al. 2016). Weiterhin sollten die in ProgRess II beschriebenen Ansätze wie Rohstoffzertifizierung, Transparenzinitiativen und die Weiterentwicklung der Deutschen Rohstoffstrategie um entwicklungspolitische Komponenten mit Nachdruck vorangetrieben werden. Das sich in Entwicklung befindliche Bewertungssystem zur „ökologischen Rohstoffverfügbarkeit" (DEHOUST et al. 2017) könnte – wie in ProgRess vorgesehen – zur Erweiterung der Bewertung der Rohstoffkritikalität genutzt werden. Dabei sollte die Bewertung nicht nur rohstoffbezogen erfolgen, sondern es müssten auch besonders belastete oder mit besonderen Risiken behaftete Abbauvorhaben und -gebiete identifiziert werden. In diesen Gebieten sollten besonders zügig Maßnahmen zum Einsatz des Stands der Technik implementiert werden. Bei allen Aktivitäten muss ein besonderes Augenmerk auf den Kleinbergbau gelegt werden, weil dieser aufgrund der hohen Beschäftigungswirksamkeit eine wichtige sozioökonomische Funktion hat (MANHART et al. 2015). Um durch die anspruchsvolle Standardsetzung keine Verschiebung hin zum großindustriellen Bergbau zu induzieren, müssen Wege für den Kleinbergbau entwickelt und gefördert werden (ebd.).

269. Ein aktuelles Vorhaben im Auftrag der Agora Verkehrswende, das die besonderen Herausforderungen der Elektromobilität für den Rohstoffsektor bearbeitet, unterlegt einige dieser Ziele mit konkreten Vorschlägen (Öko-Institut 2017):

- Schaffung einer globalen Industrieallianz für nachhaltiges Primärlithium unter der Federführung der Automobilindustrie in Zusammenarbeit mit relevanten Bergbauunternehmen und Zulieferbetrieben, Batterie- und Kathodenherstellern sowie Recyclingunternehmen;
- Einführung von verbindlichen unternehmerischen Sorgfaltspflichten (Due Diligence) entlang der Handelsketten für Kobalt. Erweiterung der Verordnung 2017/821 **zur Erfüllung der Sorgfaltspflichten in der Lieferkette** auf den Rohstoff Kobalt, Nutzung des Systems aus dem OECD Framework „Due Diligence Guidance for Responsible Supply Chains from Conflict-Affected and High-Risk Areas";
- Know-How-Transfer für nachhaltigen Bergbau;
- Aufbau eines globalen Recyclingsystems für Li-Ionen-Batterien, um langfristig den Primärbedarf zu dämpfen.

Die Bundesregierung kann aktiv und wirkungsvoll ihre Verantwortung für die Auswirkungen des Rohstoffverbrauchs wahrnehmen, indem sie die vorgenannten

Vorabfassung - wird durch die endgültige Fassung ersetzt.

Ansätze (in dieser Legislaturperiode) umsetzt (Tz. 268 f.). Eine wichtige Rolle kommt dabei der Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR) zu, die die Bundesregierung traditionell in rohstoffwirtschaftlichen Fragestellungen berät. Ausgehend von Fragen der Versorgungssicherheit werden zunehmend Menschenrechte (SPOHR 2016), Zertifizierung (STETTEN und ZANGL 2013), nachhaltige Rohstoffgewinnung (KICKLER und FRANKEN 2017) und internationale Zusammenarbeit in den Fokus genommen. Hier gilt es, zunehmend verbindliche und belastbare Vereinbarungen mit den Förderländern, aber auch den Abnehmern der Rohstoffe zu treffen.

5.5.2 Rohstoffinventar

270. Aus Rohstoffen werden Produkte gefertigt, die eine sehr unterschiedliche Nutzungsdauer haben, bevor sie in den Stoffkreislauf zurückgeführt werden oder aber diesem verloren gehen (UBA 2017i). Das anthropogene Lager an Rohstoffen gleicht einem schlecht beleuchteten Kellerraum, der über Jahrzehnte von einer großen Anzahl von Nutzenden mit einer unbekannten Menge an Produkten aller Art belegt wurde. Es ist bekannt, dass diese Produkte erhebliche Mengen an nachgefragten Rohstoffen enthalten, unbekannt sind jedoch Menge, Zustand, Ort und Einbausituation. Betrachtet man Fahrzeuge mit nicht-fossilen Antrieben als neue Produktgruppe, so könnte hier mit dem Schaffen eines gut beleuchteten strukturierten Kellerbereichs direkt bei der Markteinführung begonnen werden. Die Bereitstellung von zuverlässigen Angaben, welche Stoffströme in welchen Zeitrhythmen zu erwarten sind, ermöglicht Planung und Planungssicherheit bei Erforschung und Entwicklung neuer und angepasster Technologien. Ebenso wird eine ganzheitliche Rohstoffplanung beim konkreten Aufbau von Erfassungs- und Recyclingstrukturen erreichbar, welche sowohl die Verfügbarkeit von primären als auch von sekundären Quellen berücksichtigt. Auch der Abfluss aus dem Lager durch den Export von Gebrauchtfahrzeugen sollte erfasst und eingepflegt werden. Daneben wird durch Kenntnis der verwendeten Rohstoffe auch die Ausschleusung von unerwünschten oder (heute noch nicht erkannten) schädlichen Stoffen beim Recycling erleichtert.

Methoden zur Bestimmung und Fortschreibung länderspezifischer anthropogener Materiallager und Stoffinformationen als Rohstoffwissensbasis für Politik und Wirtschaft werden derzeit entwickelt. Für Deutschland ist das Ziel der Forschungsvorhaben eine fortschreibbare Datenbank basierend auf Einschätzungen zur Größe und Zusammensetzung von Gebäuden, Infrastrukturen und ausgewählten langlebigen Gütern sowie Analysen von Datenquellen und Kenngrößen (SCHILLER et al. 2015; HEDEMANN et al. 2017). International gibt es Bestrebungen, eine pan-europäische Datenplattform zu initiieren, um den Bestand an kritischen Rohstoffen aus verschiedenen Anwendungen zu dokumentieren (HUISMAN et al. 2016). Die sich derzeit in Entwicklung befindlichen Datenbanken (HEDEMANN et al. 2017; HUISMAN et al. 2016) können die Grundlage für ein nationales bzw. europäisches Inventar bilden, stehen jedoch vor der Herausforderung, sowohl den nicht dokumentierten Lagerbestand abzuschätzen als auch Vorgaben für eine systematische Datenerfassung zu ihrer Fortschreibung festzulegen. Eine Beschränkung auf derzeit kritische Rohstoffe greift zu kurz, da die technische Entwicklung diese Definition schnell überholen kann. Je vollständiger die Dokumentation ist, desto belastbarer wird sie und damit wertvoller für den Ausbau einer Kreislaufwirtschaft, die den Rohstoffbedarf zunehmend mit Bestandsmaterialien decken kann. Auch die Verknüpfung mit rohstoffspezifischen Strategien (s. Tz. 269) muss vorgesehen werden.

Auf politischer Ebene wird die Bedeutung des anthropogenen Lagers als Rohstoffdepot im Integrierten Umweltprogramm 2030 (IUP 2030) erwähnt (BMUB 2016a), allerdings mit dem einschränkenden Hinweis, dass der Aufwand der Stoffseparierung teilweise sehr hoch ist. Die Frage, wie dieses Lager zu dokumentieren und zu nutzen ist, wird im IUP nicht aufgeworfen.

271. Mit Blick auf die Einführung der Elektromobilität bietet sich die Chance, direkt mit Beginn der massenrelevanten Marktdurchdringung die damit verbundenen Stoff- und Materialflüsse zu „kartieren“, Nutzungsdauern zu bestimmen und somit einen Überblick zu erhalten, wann welche Materialien zur Sekundärrohstoffgewinnung bereitstehen, um diese letztlich bewirtschaften zu können. Gegenüber der derzeit stattfindenden Analyse bereits bestehender Lager, für die oft keine systematischen Stoff-/Materialinformationen vorliegen, kann hier von Anfang an eine zielgerichtete Erfassung der notwendigen Informationen erfolgen.

Der Aufbau des Inventars sollte dabei nicht nur für Fahrzeuge aller Antriebsarten erfolgen, sondern mittelfristig auch für andere Produkte, darunter insbesondere auch die für die Energieerzeugung und -speicherung installierten Anlagen, aber auch Endverbraucherprodukte wie elektrische und elektronische Geräte. So kann festge-

Vorabfassung - wird durch die endgültige Fassung ersetzt.

stellt werden, ob ähnliche Abfallströme verschiedener Produkte gleichzeitig anfallen und für das Recycling zusammengeführt werden sollten. Denkbar ist, das Inventar bei der BGR in Zusammenarbeit mit dem UBA anzusiedeln, um eine direkte Verknüpfung mit dem Thema Rohstoffbedarfe zu erreichen.

5.5.3 Kreislaufpass und anspruchsvolle Recyclinganforderungen

272. Damit die im Materiallager vorhandenen Stoffe und Materialien am Ende ihrer Nutzungsdauer auch tatsächlich hochwertig rezyklierbar sind, ist es notwendig, auf Produktebene Stoffe und Materialien einzusetzen, die jeweils für sich hochwertig rezyklierbar sind, sich aber auch aus dem komplexen Materialverbund eines Bauteils bzw. des gesamten Produktes separieren lassen. Die gute Recyclingfähigkeit muss dabei mit anspruchsvollen Anforderungen an das Recycling in der Abfallphase einhergehen. Denn Deutschland hält zwar für die derzeit in die Abfallphase kommenden Altfahrzeuge die Recycling- und Verwertungsquoten der Altfahrzeug-Richtlinie ein, aber es findet oft ein Downcycling statt. So führt zum Beispiel der Eintrag von Kupfer in die Stahlfraktion dazu, dass der Stahl nicht wieder in eine hochwertige Anwendung wie den Fahrzeugbau gehen kann, sondern als Baustahl weiterverwendet wird (ALLWOOD et al. 2016; SANDER et al. 2017b). Weiterhin können die spezifischen Eigenschaften bestimmter Stahlsorten, die sich aus dem Zusatz spezieller Legierungselemente ergeben, nach dem Recycling nur genutzt werden, wenn die verschiedenen Stähle getrennt erfasst oder entsprechend sortiert und anschließend spezifisch rezykliert werden (UNEP 2011; RECK 2014). Dies trifft zum Beispiel auf HSLA-Stahl zu (UNEP 2011), der vermehrt im Automobilbereich eingesetzt wird. In den aktuellen Recyclingprozessen werden Legierungselemente aber zum Teil verschlackt und nicht oder wenig funktional genutzt (NAKAJIMA et al. 2009; 2010). Edel- und Sondermetalle aus der Elektronik jetziger Altfahrzeuge werden nur teilweise zurückgewonnen, nämlich dann, wenn elektronische Bauteile demontiert werden oder sie in der Sortierung nach dem Schredderprozess in die Kupferfraktion gelangen. Eine weitgehende vorgeschaltete Demontage würde die Rückgewinnungsquote deutlich erhöhen (SANDER et al. 2017b).

273. Zur Entwicklung von spezifischen Recyclingtechnologien für Elektrofahrzeuge fanden und finden eine Reihe staatlich geförderter Projekte statt, die allerdings jeweils nur eine einzelne Komponente von Elektrofahrzeugen in den Blick nehmen: Für das Recycling von Batterien insbesondere EcoBatRec (WEYHE und FRIEDRICH 2016), LithoRec (Verbundprojekt LithoRec II 2016) und LiBri (TREFFER 2011), für das Recycling von Elektromotoren insbesondere MORE (BAST et al. 2014) und für das Recycling der Leistungselektronik ElMoRel (SCHÜLER et al. 2017). Die Wirtschaftlichkeit einer Separierung von Bauteilen, die Edel- und Sondermetalle enthalten, aus Altfahrzeugen wurde ebenfalls untersucht (GROKE et al. 2017). Auch Fragen des Recyclings von Leichtbaumaterialien für den Karosseriebau werden adressiert (GUDE et al. 2015).

Um das Ziel einer Verwertung im echten Sinne zu erreichen und somit qualitativ hochwertige Sekundärrohstoffe bereitzustellen und den Druck auf Primärressourcen inklusive der damit verbundenen Umweltwirkungen zu verringern, müssen Elektrofahrzeuge jedoch auch als Ganzes betrachtet werden. Voraussetzung ist eine belastbare Methodik zur Messung der Recyclingfähigkeit. Schon der erste Schritt, das heißt die Frage wie die Einzelkomponenten und -module separiert werden, ist für die Qualität des Sekundäreinsatzes oft entscheidend. Bereits bei der Produktentwicklung ist die Recyclingfähigkeit einzubeziehen. Befragungen im Rahmen der FOREL-Studie haben gezeigt, dass insbesondere in den ersten beiden Phasen der Produktentwicklung im Fahrzeugsektor (Konzept- und Entwurfsphase) kaum eine Beachtung der Recyclingfähigkeit im Vergleich zu Kosten und Werkstoffeigenschaften erfolgt (LIEBERWIRTH et al. 2016).

274. Um zukünftig eine hohe Recyclingfähigkeit und das Wissen um Material- und Stoffnutzungen auf Produkt- und volkswirtschaftlicher Ebene zu systematisieren, ist es notwendig, Recyclingaspekte verpflichtend als Teil der Produktentwicklung zu betrachten und der Qualität des Recyclings einen hohen Stellenwert zukommen zu lassen. Dass ein Fahrzeug (unabhängig von der Antriebsart) hochwertig rezyklierbar ist und wie dies erreicht werden soll, sollte in einem „Kreislaufpass“ dokumentiert werden. Dieser Pass sollte als Voraussetzung für die Typzulassung gemäß der Typengenehmigungs-Richtlinie 2005/64/EG gelten. Dabei wäre sowohl auf der Stoff-/Materialebene als auch auf der Bauteilebene bzw. bezüglich des gesamten Fahrzeuges aufzuzeigen, wie ein möglichst vollständiges und hochwertiges Recycling am Ende der Nutzungsdauer erreicht werden kann. Auch Frage-

Vorabfassung - wird durch die endgültige Fassung ersetzt.

stellungen zur Separierung in Einzelkomponenten (z. B. auch Separierung verschiedener in Leichtbauweise genutzter, miteinander verbundener Materialien wie Stähle und Aluminium), zur Schadstoffentfrachtung, zu Recyclingwegen für Einzelkomponenten, zum Einsatz der gewonnenen Sekundärrohstoffe, aber auch zur Erfassung, Finanzierung und der Nachnutzung (z. B. der Batterien) sind zu beantworten.

275. In diesem Zuge ist es notwendig, die Definition von Recycling bzw. stofflicher Verwertung zu konkretisieren. Solange Downcycling auch dort stattfindet, wo es vermieden werden könnte, kann keine echte Kreislaufwirtschaft erreicht werden. Im Zuge der Umsetzung des EU-Kreislaufwirtschaftspaketes sowie der Diskussionen zu ProgRess III sollte dringend eine Debatte zur Hochwertigkeit des Recyclings gestartet werden. Ziel ist, dass die Sekundärrohstoffe für einen gleichwertigen Zweck eingesetzt werden (sog. funktionelles Recycling, s. UNEP 2011; RECK 2014).

Die im „Kreislaufpass" hinterlegten Daten fließen gleichzeitig in das Inventar (s. Tz. 270 ff.) ein, aus dem prognostiziert werden kann, wann welche im Lager gebundenen Stoffe und Materialien „zur Bewirtschaftung" anfallen. Zur Ausgestaltung des „Kreislaufpasses" könnten bestehende Informationssysteme wie IDIS (International Dismantling Information System – Demontageinformationssystem für Altfahrzeuge) und IMDS (International Material Data System – Materialdaten-System der Automobilindustrie) genutzt werden. Notwendig ist dabei eine lernende Weiterentwicklung der Systeme, um die jeweils aktuellen Entwicklungen und Herausforderungen für den späteren Fahrzeugrücklauf aufzubereiten (KOHLMEYER 2014).

276. Spezifisch für Elektrofahrzeuge ist es notwendig, den Anwendungsbereich und die Ziele der Altfahrzeug- und der Batterie-Richtlinie zu überprüfen und anzupassen. Dabei muss – für alle Antriebsarten geltend – eine Abkehr von den derzeit verankerten Massenquoten hin zu bauteilspezifischen Anforderungen vollzogen werden. Auch ist eine Definition von Qualitätsstandards der gewonnenen Sekundärrohstoffe bzw. eine klare Definition der besten verfügbaren Techniken über die gesamte Recyclingkette zur Erreichung einer hochwertigen stofflichen Verwertung aufzunehmen. So sollten für Bauteilgruppen wie Karosserie, Motor, Batterie und Leistungselektronik spezifische Recyclingziele verankert werden. Diese Umgestaltung entspricht den Zielen einer hochwertigen Kreislaufführung. Die höheren Kosten werden über die bestehende Herstellerverantwortung abgedeckt. So wird der wirtschaftliche Anreiz für die Entwicklung von Fahrzeugen, die einfacher verwertet oder deren Bauteile sogar wiederverwendet werden können, gesteigert.

Fazit

277. Rohstoffe müssen mittelfristig internationalen Umwelt- und Sozialstandards bei der Rohstoffgewinnung genügen. Die Bundesregierung sollte Instrumente wie Rohstoffpartnerschaften, Zertifizierung und internationale Zusammenarbeit in Kooperation der Ressorts Umwelt, Wirtschaft sowie wirtschaftliche Zusammenarbeit und Entwicklung deutlich ausbauen.

Außerdem sollte sie den Aufbau eines Rohstoffinventars forcieren, um Planungssicherheit beim Aufbau von Recyclingstrukturen sowie die langfristige Planung für erwartbare Sekundärrohstoffmengen zu ermöglichen. Erfasst werden sollten dabei mittelfristig nicht nur Fahrzeuge, sondern auch andere Produkte, darunter insbesondere auch die für die Energieerzeugung und -speicherung installierten Technologien, aber auch Endverbraucherprodukte wie elektrische und elektronische Geräte. So kann festgestellt werden, ob ähnliche Abfallströme verschiedener Produkte gleichzeitig anfallen und für das Recycling zusammengeführt werden sollten. Denkbar ist, das Inventar zur direkten Verknüpfung mit dem Thema Primärrohstoffe bei der BGR anzusiedeln und in Kooperation mit dem UBA zu führen.

Die Bundesregierung sollte die Zulassung neuer Fahrzeugtypen (aller Antriebs- und Fahrzeugarten) mit der Bereitstellung eines „Kreislaufpasses" verknüpfen, in dem die Hersteller Informationen zu Rohstoffen, Demontageplänen und eine Verwertungsplanung zur Verfügung stellen. Dafür ist bereits bei der Produktentwicklung ein umfassendes Konzept zu entwickeln.

Die Begriffe Recycling und stoffliche Verwertung sind mit dem Anspruch „gleicher oder höherwertiger Einsatz" klar zu definieren und in den relevanten Gesetzes- und Verordnungstexten zu verankern. Für die Verwertungswege sind die besten verfügbaren Techniken über die gesamte Recyclingkette zur Erreichung einer hochwertigen stofflichen Verwertung zu bestimmen. Die Bundesregierung sollte sich auch auf europäischer Ebene für eine Konkretisierung engagieren.

Um die Prüfung und konkrete Implementierung spezifischer Anforderungen für Elektrofahrzeuge voranzubringen, sollte sich die Bundesregierung gegenüber der Europäischen Kommission dafür einsetzen, dass die

Vorabfassung - wird durch die endgültige Fassung ersetzt.

Altfahrzeug- und die Batterie-Richtlinie zügig in die Revision gehen und an die Anforderungen der Elektromobilität angepasst werden.

5.6 Streckenabhängige Pkw- und Lkw-Maut

278. Mautsysteme sind als Steuerungsinstrument für die Verkehrsverlagerung, Verkehrsvermeidung, Verkehrslenkung sowie Effizienzverbesserung und Flottenerneuerung seit langem Teil der wissenschaftlichen Diskussion. Bestehende Mautsysteme dienen bislang überwiegend zur Deckung von Wegekosten, so zum Beispiel in Deutschland die Lkw-Maut und die geplante Pkw-Maut, oder zur Kapazitätsauslastungssteuerung und Stauvermeidung wie Road-Pricing-Systeme in Städten wie etwa in Singapur oder London. Aufgrund der vorhandenen technischen Möglichkeiten zur räumlichen (z. B. nach Streckenkategorien oder zwischen ländlichen und urbanen Räumen), zeitlichen (Tag vs. Nacht) und sächlichen Differenzierung (z. B. nach Fahrzeugkategorien) ergeben sich Potenziale, Mauten über die Höhe und Spreizung der Tarife umweltgerecht auszugestalten. Dafür sind vor allem satellitengestützte Mauterhebungssysteme geeignet, die durch den technischen Fortschritt der letzten Jahre erheblich günstiger zu betreiben sein dürften als noch bei der Einführung der deutschen Lkw-Maut. Darüber hinaus kann bei der Einführung neuer Mautsysteme weltweit von weiteren Kostendegressionen für Geräte und Ausrüstungen durch Lernkostenkurven- und Mengeneffekte ausgegangen werden.

Für eine Verminderung der CO_2-Emissionen kommen insbesondere fahrleistungsbezogene Ansätze infrage. Diese sind jedoch weniger treffsicher als Energiesteuern auf Kraftstoffe (Kap. 5.1). Dennoch wird die Berücksichtigung des spezifischen CO_2-Ausstoßes als Baustein einer (auch) nach ökologischen Kriterien differenzierten Maut und damit Teil einer umfassenden Strategie zur Dekarbonisierung des Verkehrssektors angesehen. Eine Abstimmung beider Lenkungsinstrumente miteinander wird für sinnvoll erachtet.

Die Einführung einer streckenabhängigen Pkw-Maut ist insbesondere auch mit Blick auf die zukünftige Verbreitung autonomer Fahrzeuge geboten. Wie in Kapitel 4.5 dargestellt, ist davon auszugehen, dass die Verbreitung autonomer Fahrzeuge ohne eine entsprechende politische Rahmensetzung aufgrund ihrer veränderten Kosten-Nutzen-Bilanz zu einem deutlichen Anstieg der Verkehrsnachfrage und in Konsequenz auch zu erhöhten Umweltbelastungen führen könnte. Die Lenkungswirkung einer entsprechend ausgestalteten Pkw-Maut kann helfen, unnötige Leerfahrten von autonomen Fahrzeugen zu vermeiden, einen weiteren Anstieg der Beförderungsleistung zu verhindern und die intermodale Nutzung autonomer Fahrzeuge in Kombination mit dem öffentlichen Personennahverkehr (ÖPNV) finanziell anzureizen.

Lkw-Maut

279. 2005 wurde eine fahrleistungsbezogene, nach Gewichts- und Emissionsklassen differenzierte Lkw-Maut in Deutschland eingeführt, zunächst für Fahrzeuge ab 12 t, seit dem Jahr 2015 ab 7,5 t zulässigem Gesamtgewicht. Die Höhe der Mautsätze orientiert sich vornehmlich an den gewichtsspezifischen Wegekosten. Nur zu Differenzierungszwecken kommen auch Umweltaspekte, insbesondere in Form der EURO-Normen, zum Einsatz. Bisher sind europarechtlich keine verursachungsgerechten Mauten auf CO_2-Emissionen möglich. Zudem sind die Mautbeträge für externe Lärm- und Luftschadstoffkosten in der 2011 angepassten Wegekosten-Richtlinie 1999/62/EG willkürlich gedeckelt. Seit dem 31. Mai 2017 liegt allerdings ein Entwurf der Europäischen Kommission zur Änderung der Wegekosten-Richtlinie vor (vgl. Europäische Kommission 2017c). Dieser beinhaltet neben zahlreichen weiteren Neuerungen, wie dem Einbezug aller Fahrzeugklassen in den Geltungsbereich der Richtlinie, einer verbesserten Berechnung lokaler externer Lärm- und Luftschadstoffkosten und des erstmaligen Einbezugs von Staugebühren, auch den Vorschlag, CO_2-Emissionen bei der Gebührenstaffelung zu berücksichtigen.

Im Rahmen des letzten Wegekostengutachtens für das deutsche Bundesfernstraßennetz (und Lkw mit mehr als 12 t zGG) wurden auch externe Kosten kalkuliert. Diese weisen deutlich höhere Beträge für die tatsächlichen Lärm- und Luftschadstoffkosten pro Fahrzeugkilometer (Fz-km) auf Bundesstraßen aus, als sie nach der aktuellen Richtlinie zulässig wären. So würden im Jahr 2017 nur 39,1 % aller externen Luftschadstoffkosten, die durch Verkehre entstehen, auf Bundesautobahnen durch den entsprechenden europarechtlich zulässigen Mautanteil abgedeckt; bei Lärmkosten ist der Anteil mit 16,7 % (für 2013) noch geringer (KORN et al. 2014, S. 160 und 171). Aktuell entsprechen die deutschen Mautsätze für Luftverschmutzung den Höchstsätzen von 2014, während der Mautteilsatz für Lärmbelastung derzeit nicht erhoben wird. Eine politische Einflussnahme Deutschlands auf EU-Ebene im Sinne des Vorschlags der Europäischen

Vorabfassung - wird durch die endgültige Fassung ersetzt.

Kommission zur Änderung der Wegekosten-Richtlinie ist angebracht, um diese erhöhten Kosten zu internalisieren (UBA 2015b, S. 5).

Positiv ist, dass ein Teil der staatlichen Einnahmen aus der Lkw-Maut zum Beispiel als Zuschuss zum Kauf neuer emissionsarmer Lkw an Fuhrunternehmen zurückfloss. Dies führte in der Vergangenheit – ebenso wie die Mautspreizung nach Luftschadstoffklassen – zu einer dynamischeren Flottenverjüngung mit geringeren spezifischen CO_2-Emissionen. Die schnellere Flottenerneuerung war eine der bisherigen Hauptwirkungen der Lkw-Maut. Bei einer stark modernisierten Lkw-Flotte werden jedoch die Grenzen der Wirksamkeit der aktuellen Gebührenstaffelung nach Schadstoffklassen erreicht. Deshalb ist der Fokus des Kommissionsvorschlags zur Anpassung der rechtlichen Rahmenbedingungen hin zu einer stärker nach CO_2-Emissionen differenzierenden Maut begrüßenswert.

Ab 2018 wird die Lkw-Maut, die derzeit auf Bundesautobahnen und ausgewählten Ausweichstrecken gilt, auf alle Bundesstraßen ausgedehnt. Dies sieht der SRU als sinnvollen Schritt zu einer umfassenden Bepreisung der Verkehrswege. Aus klimapolitischer Perspektive ist eine Ausweitung der Maut auf alle Straßen zu fordern. Darüber hinaus sollte die Gewichtsgrenze für mautpflichtige Lkw auf Nutzfahrzeuge mit mehr als 3,5 t zulässigem Gesamtgewicht abgesenkt werden (UBA 2015b, S. 4). Ebenso sollten die bisher nicht mautpflichtigen Reisebusse in das Lkw-Mautsystem integriert werden.

280. Die Finanzierung der Oberleitungsinfrastruktur, die für die Elektrifizierung des Güterschwerverkehrs mittels Oberleitungs-Hybrid-Lkw benötigt wird (Abschn. 5.4.2), könnte ebenfalls über die Lkw-Maut erfolgen. Die Bundesregierung sollte sich deshalb auf europäischer Ebene dafür einsetzen, dass die Kosten für die Oberleitungsinfrastruktur in die – über die Maut refinanzierten – Wegekosten eingepreist werden können. Dabei sollten alle Lkw-Klassen, die sich grundsätzlich für eine Elektrifizierung mittels Oberleitungsabnehmer eignen, zur Finanzierung beitragen, unabhängig davon, ob sie von der Option tatsächlich Gebrauch machen oder nicht.

Pkw-Maut

281. Ab dem Jahr 2018 wird in Deutschland eine Pkw-Maut eingeführt. Diese ist jedoch nicht streckenbezogen, sondern wird als zeitbezogene Vignette realisiert. Im Gegenzug wird die jährliche Kfz-Steuer deutscher Fahrzeughalterinnen und -halter abgesenkt. Die Wirkung der Vignette entspricht in etwa der der Kfz-Steuer. Schon wegen ihrer geringen Höhe kann kaum mit ökologischen Lenkungswirkungen auf die Fahrzeugflotte und auf das Fahrverhalten gerechnet werden, auch wenn die Vignettentarife nach Umweltgesichtspunkten differenziert werden. Eine entfernungsabhängige Maut mit auch nach CO_2-Ausstoß differenzierten Tarifen wäre deutlich verursachungsgerechter. Sie könnte zur Verkehrsvermeidung, -verlagerung, effizienten Verkehrslenkung und Flottenerneuerung beitragen. Wichtige Aspekte, die bei der Einführung einer solchen streckenabhängige Pkw-Maut zu berücksichtigen wären, sind unter anderem die Höhe der Erhebungskosten sowie der Datenschutz.

282. Die mögliche Wirkung einer streckenabhängigen Pkw-Maut wurde unter anderem in einem Forschungsprojekt modelliert. Diesem speziellen Szenario liegt die Annahme zugrunde, dass im Jahr 2050 als Lenkungsinstrument eine fahrleistungsabhängige Pkw-Maut in Höhe von 4 ct/km auf allen Straßen gilt. Die Höhe der Maut orientierte sich in dem Projekt an den anteiligen Kosten für Bau und Erhaltung der Infrastruktur. Räumliche Ausweicheffekte wurden durch den netzweiten Gültigkeitsbereich ausgeschlossen. Im Szenario führte die modellierte Pkw-Maut zu einer 40%igen Steigerung der unmittelbar durch die Nutzung bedingten Kosten (sog. Out-of-pocket-Kosten) des motorisierten Individualverkehrs (MIV). Dies bewirkte eine Verminderung des Pkw-Bestandes um 3 %, eine deutliche Reduktion der MIV-Fahrleistung um 20 % sowie Verlagerungen von Verkehr auf die Schiene und andere Verkehrsmittel (Öko-Institut et al. 2016). Die Modellierung weist darauf hin, dass die Einführung einer Maut für das gesamte Straßensystem einen wichtigen Beitrag zur Verkehrsverlagerung und -vermeidung leisten kann.

Die Bepreisung von Mobilität für alle Verkehrsmittel im Sinne einer volkswirtschaftlichen Vollkostenrechnung führt zu einer verursachungsgerechten Anlastung von Umwelt-, Gesundheits- sowie Infrastrukturkosten und fördert die Verlagerung auf den Umweltverbund. Das UBA geht bei einer vollständigen Anlastung von sowohl Wege- als auch Umweltkosten von Mautsätzen zwischen 6,5 ct/km (Autobahn, Benziner) und 10,8 ct/km (übrige Bundesstraße, Diesel) für das Jahr 2017 aus (BERGK et al. 2017, S. 28). Eine differenzierte Ausgestaltung wird in einem aktuellen Gutachten vorgeschlagen: Wege, auf denen keine sinnvolle Alternative mit dem öffentlichen Personenverkehr besteht, sollten niedriger bemautet werden und auch mit dem Auto erschwinglich bleiben, während im mit dem öffentlichen Verkehr gut erschlossenen Raum höhere Mautsätze anfallen würden (RUDOLPH et al. 2017, S. 11).

Vorabfassung - wird durch die endgültige Fassung ersetzt.

283. Im Juni 2017 wurde die Gründung einer privatrechtlich organisierten Infrastrukturgesellschaft für Bundesfernstraßen im Eigentum des Bundes beschlossen, die ab dem Jahr 2021 mit ihrer Tätigkeit beginnt (s. dazu: Bundesrechnungshof 2017). Der Bund übernimmt die bisher bei den Ländern liegenden Aufgaben hinsichtlich Planung, Bau, Betrieb und Erhaltung der Fernstraßen und führt sie in der neuen Infrastrukturgesellschaft zusammen. Aus dem Bundeshaushalt erhält diese Gesellschaft die Mittel aus der Pkw- und Lkw-Maut für die Ausgaben bei den Bundesfernstraßen. Diese verkehrsträgerspezifische Zweckbindung der Mauteinnahmen ist umweltpolitisch kontraproduktiv und birgt Risiken für eine staatlich erwünschte und ökologisch sinnvolle Mauthöhe. Darüber hinaus soll die Infrastrukturgesellschaft eigenständig räumliche und zeitliche Priorisierungen von Neu- und Ausbauvorhaben im Bundesfernstraßenbereich vornehmen. Damit wird die bisher der Politik zustehende Entscheidungskompetenz über Straßenbauvorhaben an die Infrastrukturgesellschaft abgegeben, was unter Umständen ebenfalls umweltpolitisch motivierten, verkehrsträgerübergreifenden Netzentwicklungsstrategien des Staates zuwiderlaufen kann.

284. Die Europäische Kommission hat Ende Mai ein Gesetzespaket für den Mobilitätssektor vorgestellt (Europäische Kommission 2017a). Darin schlägt sie europaweit einheitliche Regeln für die Mautsysteme vor. Die bisherige Fassung der europäischen Wegekostenrichtlinie erlaubt bereits eine Differenzierung von Straßennutzungsgebühren nach den Lärm- und Luftschadstoffemissionen des Fahrzeugs. Dies soll in Zukunft obligatorisch sein. Die Mitgliedstaaten sollen zudem entsprechend des Verursacherprinzips die Höhe der Straßenbenutzungsgebühr vom CO_2-Ausstoß der Fahrzeuge abhängig machen. Sie sollen außerdem flexiblere Möglichkeiten haben, bei der Höhe der Gebühren externe Kosten, wie beispielsweise Lärm, Verkehrsüberlastung und Luftverschmutzung, zu berücksichtigen. Alle Mautsysteme sollen langfristig einheitlich auf der Grundlage der Entfernung statt auf der Grundlage des Nutzungszeitraums erhoben werden, um so das tatsächliche Maß der Nutzung, Emissionen und Umweltverschmutzung besser widerzuspiegeln. Dementsprechend sollen ab 2023 für schwere Nutzfahrzeuge und ab 2027 auch für alle anderen Fahrzeugkategorien entfernungsabhängige Systeme eingeführt werden, sofern die Mitgliedstaaten überhaupt eine Bemautung ihres Straßennetzes beschließen (vgl. Europäische Kommission 2017c).

285. Eine streckenabhängige Maut muss einen ausreichenden Datenschutz sicherstellen. Eine verursachungsgerechte Belastung der Autofahrerinnen und Autofahrer ist nur möglich, wenn eindeutig zu erheben ist, welches Fahrzeug zu welchem Zeitpunkt auf welcher Strecke gefahren ist. Das Ziel auf Basis dieser Informationen die Autofahrerinnen und Autofahrer finanziell zu belasten, macht es erforderlich, exakte Daten über ebendiese Parameter zu erheben. Dazu wird eine sogenannte On-Board-Unit (OBU), ein elektronisches Gerät, genutzt, das in das Fahrzeug eingebaut wird und Informationen zur Fahrzeugnutzung speichert. Eine naheliegende Option wäre die Erfassung der Reiseroute per GPS (Global Positioning System) in Echtzeit. Aber auch ein kabelloses Sender-Empfänger-System, das automatisch beim Passieren bestimmter Knotenpunkte wie Autobahnabfahrten oder Ortseingängen Daten über den Straßentyp an das passierende Fahrzeug sendet, wäre möglich und wird in begrenztem Rahmen bereits verwendet (z. B. das elektronische Mautsystem in Singapur). Eine solche Variante würde es zulassen, keine präzisen personen- oder fahrzeugbezogenen Geoinformationen zu erheben, sondern in Kombination mit einem mit der OBU verbundenem Entfernungsmesser lediglich festzustellen, in welchem Umfang sich auf welchem Straßentyp bewegt wurde.

Unabhängig von der gewählten Methode zur Erhebung der Daten sind die anschließenden Schritte des Abrechnungsprozesses ähnlich. Es wird zuerst bestimmt, auf was für einem Straßentyp sich das Fahrzeug befindet, der für diesen Abschnitt fällige Betrag wird errechnet, und abschließend werden diese Teilbeträge zu einer Summe für die Gesamtfahrt aufaddiert.

Aus Datenschutzperspektive ist dabei entscheidend, wie sich diese Schritte zwischen den datenverarbeitenden Instanzen (OBU und Maut-Zentrale) aufteilen und ob die Daten verschlüsselt bzw. anonymisiert versendet werden (International Working Group on Data Protection in Telecommunications 2009, S. 6). Für die Datenverarbeitung gibt es grundsätzlich zwei Konzepte: Eine zentrale Aggregation der erfassten Daten zum Beispiel bei dem Betreiber des Mautsystems oder eine Zusammenführung ebendieser Daten im Fahrzeug selbst. Bei der zentralen Verarbeitung werden Fahrzeug-ID sowie GPS-Daten an den Betreiber übermittelt und dort der zu zahlende Mautbetrag errechnet. Der alternative Ansatz führt all diese Berechnungen im OBU des Fahrzeugs durch und sendet lediglich die ID des Autos sowie den zu zahlenden Betrag an die Zentrale. Kann ein anonymisiertes Bezahlsystem, zum Beispiel über ein bargeldgestütztes Prepaid-Modell, sichergestellt werden, bedeutet dies ein „profilloses“ System, das keine personen- oder fahrzeugbezogenen Daten erhebt (ebd.).

Vorabfassung - wird durch die endgültige Fassung ersetzt.

Zwischen 2007 und 2010 wurde in den Niederlanden ein streckenabhängiges Mautsystem ausgearbeitet und anschließend wieder verworfen, das auf eine zentrale Verarbeitung der Daten setzt und keine anonyme Bezahlung zulässt (RDW 2012, S. 71). Und auch das 2006 in Deutschland in Betrieb genommene, streckenbezogene Mautsystem für Lkw – Toll Collect – verknüpft Fahrzeug und Routenprofil (ebd., S. 93). Es besteht somit noch weiterer Forschungsbedarf, um ein System zu entwickeln, das aus Datenschutzperspektive unbedenklich ist.

286. Im Ergebnis empfiehlt der SRU die Fortentwicklung der Pkw-Maut zu einer streckenabhängigen Pkw-Maut. Es sollte möglichst schnell ein Gesamtkonzept erarbeitet und die bestehenden Mautsysteme in eine einheitliche Gestaltung überführt werden. Der Grad der Ausdifferenzierung bei der Erhebung der streckenabhängigen Maut sollte dabei von den ökologischen Vorteilen und der Lenkungswirkung einerseits und dem Datenschutz und Erhebungsaufwand andererseits bestimmt sein.

5.7 Geschwindigkeitsbeschränkungen auf Autobahnen

287. Die Bundesrepublik Deutschland ist der einzige Staat in Europa ohne allgemeine Geschwindigkeitsbegrenzung für Pkw auf Autobahnen. Sogar weltweit gibt es nur eine Handvoll Staaten, die darauf verzichten, die Geschwindigkeit auf Autobahnen einzuschränken. Da mit einer Verdoppelung der Geschwindigkeit eine Vervierfachung des Luftwiderstands verbunden ist, hilft die Einführung einer allgemeinen Geschwindigkeitsbegrenzung die Verbräuche drastisch zu senken und den Schadstoffausstoß von Fahrzeugen zu verringern. Die Einführung einer Geschwindigkeitsbeschränkung wird aus diesen Gründen seit Jahren gefordert und würde auch dazu beitragen, die Unfallzahlen zu senken.

Der SRU vertrat schon in seinem Verkehrsgutachten 2005 die Auffassung, dass zur Erhöhung der Verkehrssicherheit und zur Senkung von Umweltbelastungen die bisher unverbindliche Richtgeschwindigkeit von 130 km/h auf Bundesautobahnen in ein verbindliches Tempolimit umgewandelt und mittelfristig eine weitere Absenkung auf 120 km/h angestrebt werden sollte (SRU 2005, Tz. 7; zu Tempo 30 innerorts: SRU 2012, Tz. 325). Zur besseren Durchsetzung der bestehenden bzw. neu einzuführenden Geschwindigkeitsbeschränkungen schlug er eine Ausweitung der Kontrollintensität und eine schärfere Sanktionierung auch in Form temporärer Fahrverbote vor. Diese Empfehlungen bleiben somit weiter aktuell.

Neben den direkten Effekten eines allgemeinen Tempolimits auf den Kraftstoffverbrauch und die CO_2-Emissionen durch eine Verringerung der Höchstgeschwindigkeiten und eine Verbesserung des Verkehrsflusses, tragen auch indirekte Effekte zu einer Verringerung von Energieverbrauch und Emissionen bei. Bei der Entwicklung von Motoren werden diese für hohe, auf deutschen Autobahnen erlaubte Geschwindigkeiten ausgelegt. Die Einführung eines allgemeinen Tempolimits würde voraussichtlich dazu führen, dass die durchschnittliche Motorenleistung und das Gewicht des Antriebsstrangs abnehmen. Weitere Gewichtsreduktionen könnten daraus resultieren, dass mit geringeren Höchstgeschwindigkeiten die fahrzeugseitigen Anforderungen zur Gewährleistung des gleichen Maßes an Unfallsicherheit abnehmen. Leichtere und geringer motorisierte Fahrzeuge weisen allgemein einen niedrigeren spezifischen Energieverbrauch und CO_2-Ausstoß aus. Dieser Effizienzvorteil kommt auch bei geringeren Geschwindigkeiten zum Tragen. Da Motoren nicht ausschließlich für den deutschen Markt entwickelt werden, sondern auch in anderen Ländern zum Einsatz kommen, könnte ein Tempolimit in Deutschland sogar grenzüberschreitend zu einer Minderung der CO_2-Emissionen beitragen. Durch die Verbesserung der durchschnittlichen Energieeffizienz und die damit einhergehende Verringerung der benötigten Batteriekapazität würde ein generelles Tempolimit überdies indirekt zur Marktdurchdringung der Elektromobilität beitragen.

Aufgrund der zu erwartenden Verbreitung von autonomen Fahrzeugen scheint die Einführung einer allgemeinen Geschwindigkeitsbegrenzung zusätzlich geboten. Weil autonome Fahrzeuge untereinander Informationen austauschen (V2V-Kommunikation) und menschliche Reaktionszeiten damit keine Rolle mehr spielen, können selbstfahrende Pkw auch bei höheren Geschwindigkeiten die Sicherheit der Verkehrsteilnehmerinnen und Verkehrsteilnehmer gewährleisten (WADUD et al. 2016). Da Autobahnfahrten ein wahrscheinliches und technisch frühzeitig realisierbares Nutzungsszenario von autonomen Fahrzeugen darstellen, ist davon auszugehen, dass der Anteil der Fahrzeuge, die schneller als die Richtgeschwindigkeit von 130 km/h fahren, zukünftig zunehmen wird. Damit ist ein Zuwachs des Verkehrslärms im Umfeld der Autobahnen verbunden. Weiterhin ist als indirekte Folge vorstellbar, dass der durch autonome Fahrzeuge ermöglichte Fahrzeitrückgang in Folge des Ge-

Vorabfassung - wird durch die endgültige Fassung ersetzt.

schwindigkeitszuwachses zusätzliche Verkehrsleistung induziert und auf langen Distanzen zu einer Verschiebung des Modal Splits zuungunsten des Personenschienenverkehrs beiträgt.

5.8 Fortentwicklung der Bundesverkehrswegeplanung

288. Der Bundesverkehrswegeplan (BVWP) ist das wichtigste Steuerungsinstrument für die Verkehrsinfrastrukturplanung in der Zuständigkeit des Bundes. Er legt den Investitionsrahmen für die bundeseigene Verkehrsinfrastruktur fest, also für die Bundesautobahnen und Bundesstraßen, zusammen als Bundesfernstraßen bezeichnet, die Bundesschienenwege und die Bundeswasserstraßen. Damit kommt dem BVWP eine hohe Bedeutung für künftige nachhaltige Mobilität zu. Nicht zu den Bundesverkehrswegen zählen die deutschen See- und Binnenhäfen, die Flughäfen sowie die Güterverkehrszentren, deren Planung, Bau und Unterhaltung durch Länder, Kommunen oder private Betreiber erfolgen. Allerdings ist der Bund für die Anbindung dieser Anlagen an das Netz der Bundesverkehrswege zuständig und stellt hierfür Mittel zur Verfügung (MONSE und HAßHEIDER 2017).

Der BVWP umfasst Pläne für Aus- und Neubauinvestitionen sowie Erhaltungs- bzw. Ersatzinvestitionen für die Verkehrsträger Straße, Schiene und Wasserstraße für einen Zeitraum von zehn bis fünfzehn Jahren. Das Gesamtvolumen des aktuellen BVWP beträgt 270 Mrd. Euro für den Zeitraum 2016 bis 2030. Von dieser Summe entfallen circa 70 % auf Erhaltung und Ersatzinvestitionen. Für diese werden keine Einzelmaßnahmen aufgeführt, sondern nur der Gesamtbedarf je Verkehrsträger abgeschätzt. Aus- und Neubauinvestitionen werden hingegen als Einzelprojekte bzw. Projektbündel bewertet und ausgewiesen. Im aktuellen BVWP stehen 66 Schienen- und 22 Wasserstraßenprojekten etwa 1.300 Straßenprojekte (darunter ca. 500 Ortsumfahrungen) gegenüber. Sie bilden den Kern des BVWP (BMVI 2016a).

Grundlage für die Erstellung des BVWP sind zum einen Prognosen über die Entwicklung des Verkehrsaufkommens (s. Tz. 105), zum anderen Projektanmeldungen der einzelnen Verkehrsträger. Während für den aktuellen BVWP für die Verkehrsträger Schiene und Wasserstraßen Netzplanungen wie die „Netzkonzeption 2030“ der DB AG vorlagen, wurden Straßenbauvorhaben wie bisher aus Anmeldungen der Länder ausgewählt. Alle erwogenen Neu- und Ausbauprojekte werden einer Nutzen-Kosten-Analyse unterzogen. Diese projektbezogene, gesamtwirtschaftliche Bewertung wird um umwelt- und naturschutzfachliche sowie raumordnerische und städtebauliche Analysen ergänzt, um nicht oder nur schwierig monetarisierbare Einflussfaktoren in die Investitionsplanung einbeziehen zu können (ausführlich zum Verfahren MONSE und HAßHEIDER 2017).

Überdies wurde erstmals eine Strategische Umweltprüfung (SUP) des Gesamtplans des BVWP 2030 durchgeführt. Diese mündete in einen Umweltbericht, der Umweltwirkungen beschreibt und Maßnahmen zur Vermeidung und Verminderung dieser Wirkungen darstellt (GÜNNEWIG et al. 2016). Im Rahmen der SUP wurde für den Umweltbericht auch eine Öffentlichkeitsbeteiligung durchgeführt (BMVBS 2012). Die Durchführung und Dokumentation einer SUP sowie die breite Öffentlichkeitsbeteiligung können als Fortschritte in der BVWP-Verfahrensentwicklung angesehen werden. Dennoch wurde kritisiert, dass die Einspruchsfristen zu kurz waren. Diese Tatsache veranlasste den Bund für Umwelt und Naturschutz Deutschland (BUND) zu einer Beschwerde bei der Europäischen Kommission über die Nichteinhaltung der SUP-Richtlinie 2001/42/EG im BVWP-Verfahren (Baumann Rechtsanwälte Partnerschaftsgesellschaft 2016). Das Ergebnis der Umweltprüfung zeigte, dass nur eines der zwölf Umweltkriterien erfüllt wurde. Somit ist der BVWP 2030 aus Umweltsicht als absolut unbefriedigend einzustufen. Nach Auffassung des UBA weist außerdem ein großer Teil der Verkehrsprojekte mit hoher Umweltbetroffenheit auch in der Nutzen-Kosten-Analyse für die Lärm-, Luftschadstoff- und Klimagasemissionen einen negativen Umweltnutzen aus (UBA 2016d).

289. Aus Sicht des Klimaschutzes sind für eine nachhaltige Mobilität Verkehrs- und Mobilitätskonzepte ausschlaggebend, die sich an den jeweiligen räumlichen (Ballungsräume, ländliche Räume) und infrastrukturellen Gegebenheiten orientieren und deren verkehrliche, räumliche und umweltbezogene Wirkungen berücksichtigen (BMUB 2016c). Dies ist bei der Bundesverkehrswegeplanung nicht in ausreichendem Maß der Fall, wie vielfältige Kritik belegt (RUNKEL et al. 2016a; Wissenschaftlicher Beirat beim BMVBS 2009; BUND 2017; SRU 2012, Tz. 275 ff.). Nötig ist insbesondere eine stärkere Orientierung an den Nachhaltigkeits- und Klimaschutzzielen der Bundesregierung, für deren Erreichen es auch einer verbesserten strategischen Ausrichtung der Bundesverkehrswegeplanung bedarf. Hierfür schlug der wissenschaftliche Beirat des Bundesverkehrsministeriums

Vorabfassung - wird durch die endgültige Fassung ersetzt.

die Einbindung des BVWP in ein Strategiekonzept „Mobilität und Transport“ und in daraus abgeleitete verkehrspolitisch fundierte Szenarien vor (Wissenschaftlicher Beirat beim BMVBS 2009). Die bisherige Praxis, den BVWP auf Trendprognosen mit zunehmendem Verkehrsaufkommen zu basieren, konterkariert dagegen Klimaschutzziele.

Ansätze für eine gezielte Szenarienbildung, die auch mit Nachhaltigkeitszielen kompatibel ist, gab es bereits in der Vergangenheit (BMVBW 2003). Auch der BVWP 2030 weist zunächst drei Szenarien aus, die sich in der Verteilung der Investitionsmittel auf die Verkehrsträger unterscheiden. Szenario 1 („Verkehrsleistung“) orientiert sich an der aktuellen Verkehrsleistung der Verkehrsträger in Deutschland, entsprechend fließen hier die meisten Mittel in den Straßenbau. Szenario 2 („Status quo“) geht von der 2016 aktuellen Verteilung der Aus- und Neubaumittel auf die Verkehrsträger aus und schreibt diese fort. Die Verkehrsträger Schiene und Wasserstraße erhalten hier zu ihrer Verkehrsleistung überproportionale Finanzmittel. Nur Szenario 3 („Stärkung Schiene/Wasserstraße“) folgt der Nachhaltigkeitsstrategie, die explizit eine Verkehrsverlagerung auf umweltverträgliche Verkehrsträger als Ziel formuliert. Entsprechend wurde hier eine Verstärkung der Investitionen in Schiene und Wasserstraße vorgesehen. Diese Szenarien fungieren jedoch eher als grobe Sensitivitätsabschätzungen und sind nur mit überschlägigen Rechnungen unterlegt, deren Ergebnisse Tabelle 5-2 zeigt.

Tabelle 5-2

Gesamtplanwirkung der Investitionsszenarien

Ausgewählte Wirkungsgrößen	Einheit	Szenario 1 Verkehrsleistung	Szenario 2 Status quo	Szenario 3 Stärkung Schiene/ Wasserstraße
Nutzenbarwert	Mio. € Barwert	222.691	174.982	113.203
Kostenbarwert	Mio. € Barwert	57.953	54.148	48.957
Mittleres NKV	–	3,8	3,2	2,3
Interne Nutzen der Nutzenden (Reisezeitgewinne, Betriebskosteneinsparungen etc.)	Mio. € Barwert	200.848	158.920	102.943
Nutzen aus Verkehrssicherheit	Mio. € Barwert	21.106	15.100	6.653
Monetarisierte Umweltnutzen	Mio. € Barwert	– 2.545	76	5.966
darin enthaltene Nutzen aus CO_2-Änderungen	Mio. € Barwert	– 4.478	– 1.821	3.527
darin enthaltene Nutzen aus sonstigen Schadstoffen	Mio. € Barwert	– 58	383	1.633
darin enthaltene Nutzen aus Lärm	Mio. € Barwert	1.992	1.514	806
Projekte mit hoher Umweltbetroffenheit	Anzahl	183	130	58
Flächeninanspruchnahme	Hektar	24.097	18.216	9.651
Beeinträchtigung von Naturvorrangflächen	Hektar	3.303	2.377	3.679
Erhebliche Beeinträchtigung von Natura 2000-Gebieten	Anzahl	224	174	118
Zerschneidung von unzerschnittenen Großräumen	Kilometer	3.028	2.303	1.246
Zerschneidung von unzerschnittenen verkehrsarmen Räumen	Kilometer	104.464	77.671	38.602

Quelle: BMVI 2016a, S. 35

Vorabfassung - wird durch die endgültige Fassung ersetzt.

Die Auswahl des Status-quo-Szenarios macht deutlich, dass das Nutzen-Kosten-Verhältnis (NKV) einen überragenden Einfluss auf die Auswahl von Projekten für den BVWP ausübt, obwohl die Vergleichbarkeit dieser Analysen über verschiedene Projektarten und Verkehrsträger methodisch nur eingeschränkt möglich ist. Reise- und Transportzeitgewinne der Nutzenden dominieren die gesamte Nutzenberechnung. Andere, insbesondere umweltpolitische, Ziele werden dagegen mit dem präferierten Status-quo-Szenario deutlich schlechter erreicht als mit einer stärkeren Förderung von Schiene und Wasserstraße.

Dies ist auch vor dem Hintergrund problematisch, dass der Infrastrukturausbau langfristig nicht unbedingt zu einer Verkürzung von Transport- und Reisezeiten führt. Dieser beeinflusst als Teil der Raumstruktur die Entstehung von Verkehr und erhöht die Verkehrsleistung. Vor allem die Veränderung der Erreichbarkeiten durch die Senkung des Raumwiderstands kann wiederum Verkehr induzieren (grundlegend dazu GOODWIN 1996).

Das Verfahren der Projektanmeldungen und Auswahl von Straßenprojekten für den BVWP ist – im Gegensatz zu Schiene und Wasserstraße – kaum auf das Gesamtnetz bezogen, sondern unterliegt stark Proporzüberlegungen der anmeldenden Bundesländer. Dies führt dazu, dass Autobahnneubauten und Ortsumfahrungen insgesamt eine höhere Priorität haben als die Beseitigung von Engpässen bei der vorhandenen fernverkehrsrelevanten Infrastruktur (BUND 2017). In Folge wird der BVWP nicht einmal dem Anspruch einer Optimierung des heutigen Straßennetzes gerecht.

Der Umweltbericht des BVWP betrachtete die alternativen Investitionsszenarien, von denen das Szenario 3 mit dem Ziel einer Verlagerung den verstärkten Ausbau von Schiene und Wasserstraßen fokussiert. Der Bericht zeigt, dass mit der verstärkten Finanzierung von Schienen- und Wasserstraßenprojekten, und damit einer Verlagerung des Verkehrs weg von der Straße, klimaschädliche Emissionen deutlich stärker reduziert werden könnten als bei den anderen Szenarien. Über Szenario 3 könnten CO_2-Einsparungen von 981.477 t/a umgesetzt werden, während das straßendominierte Szenario 1 eine Mehrbelastung mit CO_2 von 655.313 t/a mit sich bringt (Tab. 5-3; GÜNNEWIG et al. 2016, S. 141).

Darüber hinaus ist die integrierte, verkehrsträgerübergreifende Betrachtung von Projekten unter Berücksichtigung aller sozialen, ökonomischen, ökologischen und räumlichen Wirkungen durch die Wechselbeziehungen zwischen den Netzergänzungen nicht gewährleistet. Eine solche ganzheitliche Netzplanung würde aber die Basis für ein nachhaltiges Verkehrssystem bilden, das auch die langfristigen Wirkungen hinsichtlich Ressourcenbeanspruchung, Klimaveränderungen und Raumentwicklung adäquat berücksichtigt. Grundsätzlich beschränkt sich der BVWP als zentrales Steuerungsinstrument des Bundes auf den Infrastrukturausbau. Alle sonstigen Steuerungsinstrumente im Verkehrssektor wie Steuern und Abgaben sind dagegen nicht in eine integrative ganzheitliche Umsetzungsstrategie eingebunden (GATHER et al. 2008, S. 75).

Der SRU empfiehlt deshalb, die Bundesverkehrswegeplanung zu einer integrierten Bundesmobilitätsplanung fortzuentwickeln, die alle überregionalen Verkehrsträger (Straße, Schiene, Schiff, Luftverkehr) umfasst (SRU 2012, Tz. 277), einschließlich einer konsistenten bundesweiten Flughafenplanung (SRU 2014). Dies erfordert eine Abkehr von der rein nachfrageseitigen Begründung der Verkehrsplanung, hin zu einer integrierten Raum- und Verkehrsplanung, die bei gleichzeitiger Gewährleistung der Mobilität anstrebt, die Verkehrsleistung zu verringern und die Umwelt- und Gesundheitswirkungen des Verkehrs zu minimieren (vgl. Wuppertal Institut für Klima, Umwelt, Energie et al. 2016; Beispiel Österreich: BMVIT 2012). Die beim BVWP durchgeführte SUP ist auch für einen Bundesmobilitätsplan durchzuführen.

Ein Vorbild für die Bundesmobilitätsplanung kann die Schweiz sein, welche die zentrale Ausbauplanung für die Verkehrsnetze im Kompetenzbereich des Bundes regelt. Der aus den Planungsprozessen resultierende Sachplan Verkehr besteht zum einen aus dem strategischen und programmatischen Teil, der verkehrsträgerübergreifend ist. Zum anderen umfasst er die auf die Verkehrsträger bezogenen Umsetzungsteile Straße und Schiene/öffentlicher Verkehr. Für die Bewertung der betreffenden Infrastrukturprojekte kommt ein einheitlicher, multikriterieller Bewertungsrahmen zum Einsatz.

Dazu gehören a) eine Nutzen-Kosten-Analyse für monetarisierbare Einflussfaktoren, b) Bewertungen für quantifizierbare, aber nicht monetarisierbare Größen in Form von Gesellschafts-, Wirtschafts- und Umweltpunkten, die mit Gewichtungen klassenintern aggregiert werden, sowie c) verbale Beschreibungen weiterer wichtiger, aber nicht hinreichend quantifizierbarer Indikatoren. Insgesamt wird jedes Verkehrsinfrastrukturprojekt mit circa vierzig Indikatoren aus den Bereichen Umwelt, Wirtschaft und Gesellschaft bewertet. Darüber hinaus werden in der Schweiz aus den Kennwerten der Nutzen-Kosten-

Vorabfassung - wird durch die endgültige Fassung ersetzt.

Tabelle 5-3

Umweltbetroffenheiten für die untersuchten Gesamtplan-Szenarien

Kriterien		Szenario 1	Szenario 2	Szenario 3	Einheit
1. Monetarisierte Kriterien					
	Veränderung der Anzahl von Verkehrslärm betroffener Einwohner innerorts				
1.1	Neubelastung oder stärker betroffen	292.964	658.765	1.042.654	Einw.
	Entlastung	1.692.333	2.002.964	2.203.457	Einw.
1.2	Veränderung der Geräuschbelastung außerorts (fiktive Lärmschutzwände)	13.467	9.081	3.003	Tsd. Qm
	Umweltnutzen 1.1 + 1.2	1.992	1.514	806	Mio. €
1.3	CO_2-Emissionen	655.313	71.104	– 981.477	t/a
		– 4.478	– 1.821	3.527	Mio. €
1.4	**Emissionen von Luftschadstoffen**				
	Stickoxid-Emissionen (NO_X)	541	– 812	– 3.326	t/a
		– 68,4	351	1.430	Mio. €
	Kohlenmonoxid-Emissionen (CO)	33.949	21.253	4.024	t/a
		– 16,3	– 8,9	0,91	Mio. €
	Kohlenwasserstoff-Emissionen (HC)	240	406	368	t/a
		21,9	7,2	2,7	Mio. €
	Feinstaub-Emissionen	– 345	– 1.656	– 3.098	t/a
		– 70,5	– 12,5	79,8	Mio. €
	Schwefeldioxid-Emissionen (SO_2)	– 84	– 36	– 192	t/a
		75,8	46,8	120,9	Mio. €

Quelle: GÜNNEWIG et al. 2016, S. 139

Analyse Teilbilanzen aufgestellt. Diese eignen sich – bei geringem Zusatzaufwand – zur Betrachtung distributiver und regionalwirtschaftlicher Aspekte.

Diese Struktur des nationalen Schweizer Bewertungsrahmens sichert eine hohe Transparenz der Projektbewertungsergebnisse für verkehrspolitische Verantwortungsträger und die Öffentlichkeit. Darüber hinaus ist mit der disaggregierten Darstellung von Teilergebnissen und der Bildung von Teilbilanzen eine bessere Abschätzung von Ziel- bzw. Interessenkonflikten möglich, wodurch gegebenenfalls eine Vereinfachung von politischen Abwägungsprozessen erreicht werden kann.

Eine integrierte Bundesmobilitätsplanung für Deutschland sollte sich entsprechend auf zielorientierte Szenarien stützen, die auf konkreten umweltpolitischen, verkehrsplanerischen und raumwirtschaftlichen Zielen beruhen. Sie sollte in erster Linie die bestehenden Hauptkorridore des Verkehrs umfassen und einen klaren, intermodalen Gesamtnetzbezug unter Berücksichtigung räumlicher und verkehrsträgerbezogener Interdependenzen aufweisen. Emissionsärmeren Verkehrsträgern wie der Schiene oder der Wasserstraße ist gegebenenfalls der Vorrang vor Straßenprojekten einzuräumen. Neben reinen Infrastrukturmaßnahmen sollten auch veränderte bzw. verbesserte Bedienkonzepte und preisliche Konzepte wie Mauten und Trassenentgelte verstärkt in die entsprechenden Planungen einfließen. Die bisher strikte Orientierung an Nutzen-Kosten-Analysen zur Projektpriorisierung sollte durch die Anwendung multikriterieller Verfahren ersetzt werden, die umwelt- und raumwirtschaftlichen Zielen größeres Augenmerk bei der Entscheidungsfindung über den (Aus-)Bau von Verkehrsinfrastruktur zumessen und Zielkonflikte deutlich machen.

Vorabfassung - wird durch die endgültige Fassung ersetzt.

5.9 Reform des Personenbeförderungsgesetzes

290. Die entgeltliche oder geschäftsmäßige Beförderung ist in Deutschland im Personenbeförderungsgesetz (PBefG) geregelt. Dieses ist gegenwärtig einer kritischen Diskussion ausgesetzt. Die Gründe sind die Schwierigkeiten des öffentlichen Verkehrs im ländlichen Raum, die genehmigungsrechtlichen Hürden für die teilweise als Antwort darauf entstehenden flexiblen (d. h. bedarfsgesteuerten) Bedienformen sowie neue appbasierte Dienste, wie bespielweise Uber. Nachfolgend sollen zunächst die Herausforderungen aufgezeigt, im Anschluss der bisherige Regelungsansatz des PBefG dargestellt und abschließend eine Empfehlung im Hinblick auf seine Fortentwicklung gegeben werden.

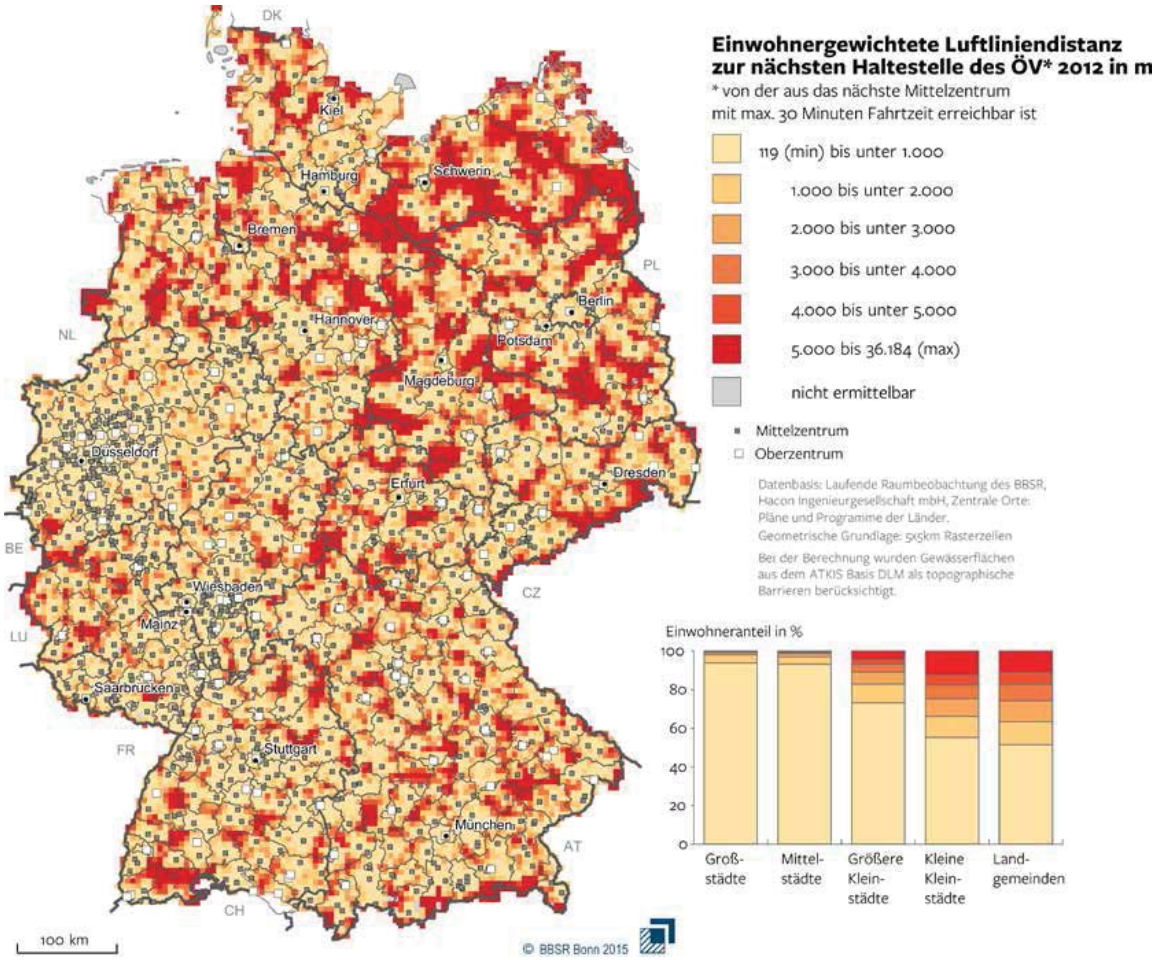
5.9.1 Ländlicher Raum und öffentlicher Personennahverkehr

291. Im ländlichen Raum zeichnen sich im Hinblick auf die Sicherstellung der öffentlichen Verkehre große Herausforderungen ab (SOMMER et al. 2016, S. 40). Dieser ist bereits jetzt durch aufkommensschwache, disperse (verstreute) Verkehre gekennzeichnet. Die Möglichkeit, mit dem ÖPNV in für die Versorgung wichtige Mittelzentren zu gelangen, ist in vielen Gegenden nicht ausreichend (Abb. 5-5).

Bislang waren die Ausgleichsleistungen für Schüler- und Auszubildendenverkehre nach § 45a PBefG eine wichtige Finanzierungsquelle des ÖPNV. Sie werden in immer

o Abbildung 5-5

Entfernung zur nächsten Haltestelle des öffentlichen Verkehrs



Quelle: BBSR 2015, S. 13, überarbeitet

Vorabfassung - wird durch die endgültige Fassung ersetzt.

Tabelle 5-4

Anteil des motorisierten Individualverkehrs am Modal Split (Fahrende + Mitfahrende)

	Verkehrsaufkommen	Verkehrsleistung
Kernstadt	48,7 %	71,0 %
Verdichtete Kreise	61,9 %	81,5 %
Ländliche Kreise	62,3 %	81,6 %

Quelle: ifas und DLR 2010, S. 46

weniger Bundesländern nach klassischer Berechnung gezahlt. Stattdessen werden sie durch andere Zahlungen ersetzt (BARTH und MEERKAMM 2016). Außerdem sinken die Schülerinnen- und Schülerzahlen aufgrund des demografischen Wandels (Rückgang der Geburtenzahlen und Abwanderung in die Städte). Gleichzeitig sind durch Schließung und Konzentration von Schulen längere Entfernungen zu überwinden, was die Fahrkosten für die Verkehrsunternehmen erhöht.

Zudem sind Buslinien, die mit einer mäandrierenden Linienführung lange Reisezeiten haben, für viele Kundinnen und Kunden nicht mehr attraktiv. Die Unternehmen sind in der Regel an einmal genehmigte Linien gebunden, teilweise mit der Folge großer Lücken in der Netzabdeckung und der Taktung. Gleichzeitig gibt es aber auch im ländlichen Raum erfolgreiche Schnellbus- und Schnellbahnlinien (Allianz pro Schiene 2015).
Gegenwärtig entwickeln sich Stadt und Land in verkehrlicher Hinsicht teilweise auseinander. In vielen Städten wird das Fahrradfahren attraktiver, gleichzeitig nimmt in manchen Städten auch die Zahl der Pkw wieder zu. Die Attraktivität des Autos lässt aber bei jüngeren Menschen – zumindest in den Großstädten – nach. Nur 55 % der jüngeren Menschen (18–29 Jahre) in Großstädten ist ein eigenes Auto wichtig oder sehr wichtig. Dagegen ist 87 % der Jüngeren in der Großstadt der Besitz eines Smartphones wichtig oder sehr wichtig (GÖTZ 2017, Folie 14). 87 % dieses Bevölkerungsanteils macht es außerdem Spaß, ihre Mobilität mit Smartphones und Apps zu organisieren (ebd., Folie 15). Auf dem Land bleibt dagegen der Anteil der der Jüngeren, denen es wichtig ist, ein eigenes Auto zu besitzen, sehr hoch (79 %) (ebd., Folie 14). Dementsprechend sind im ländlichen Raum der Bestand an Privatautos mit circa 580 Pkw je 1.000 Einwohnerinnen und Einwohner (Stand: 2014) und der Anteil des MIV besonders hoch (Tab. 5-4).

292. Der Staat kann die Erreichbarkeit von Infrastruktureinrichtungen als Aufgabe der Daseinsvorsorge (ebenso wie andere Aufgaben der Daseinsvorsorge wie Bildung und ärztliche Versorgung) bereits jetzt an manchen Orten in Deutschland nicht mehr angemessen gewährleisten. Mittelfristig wird dieses Problem an vielen Orten noch zunehmen. Um die Versorgung im ländlichen Raum aufrecht zu erhalten, auch wenn die öffentlichen Verkehre nicht überall gewährleistet werden können, gibt es zahlreiche Ansätze, zum Beispiel die Mobilität der Kundschaft durch die „Mobilität der Anbietenden“ zu ersetzen (Ärztin/Arzt, Bank, Laden im Bus). Für schulische Angebote wird über Unterricht per Videokonferenz diskutiert.

5.9.2 Regelungen des Personenbeförderungsgesetzes und Reformbedarf

293. Das PBefG regelt die entgeltliche oder geschäftsmäßige Beförderung von Personen (§ 1 Abs. 1 PBefG). Es ist nicht anwendbar, wenn das Gesamtentgelt die Betriebskosten der Fahrt nicht übersteigt (WERNER in: BAUMEISTER 2013, Rn. 34). Solche Gefälligkeitsfahrten sind vom Anwendungsbereich des Gesetzes ausgenommen.

An vielen Orten in ländlichen Räumen wird die Mobilitätssicherung im Linienverkehr durch flexible, also bedarfsgesteuerte Bedienformen und ehrenamtliches Engagement ergänzt. Die erforderlichen Genehmigungen nach dem PBefG sind in der Wahrnehmung derer, die sich engagieren, zum Teil schwer zu erhalten (KARL et al. 2017, S. 5).

Gleichzeitig sind die flexiblen Angebote gegenwärtig einem starken Wandel unterworfen. Die Digitalisierung hat neue appbasierte Fahrdienste wie Uber ermöglicht. Uber ist ein amerikanisches Dienstleistungsunternehmen mit Sitz in San Francisco, das in vielen Städten der Welt Online-Vermittlungsdienste zur Personenbeförderung anbietet. Die Vermittlung erfolgt über eine Smartphone-App oder eine Website. Das Unternehmen erhebt dabei

Vorabfassung - wird durch die endgültige Fassung ersetzt.

eine Provision von bis zu 20 % des Fahrpreises. Seit der Grundsatzentscheidung des Landgerichts Frankfurt (OLG Frankfurt, Urteil vom 9. Juni 2016, Az. 6 U 73/1) ist UberPop in Deutschland als wettbewerbswidrig untersagt, weil der Fahrpreis die Betriebskosten übersteigt und es sich damit um eine genehmigungsbedürftige Personenbeförderung handelt, aber weder das die Fahrten vermittelnde Unternehmen Uber noch die vermittelten Fahrerinnen und Fahrer die erforderliche Genehmigung nach dem PBefG besitzen. Insbesondere fehlte den Fahrerinnen und Fahrern die erforderliche Berechtigung zur Personenbeförderung.

294. Damit eine Person oder ein Unternehmen im Sinne des PBefG eine Person entgeltlich oder geschäftsmäßig befördern darf, ist eine Genehmigung notwendig (§ 2 PBefG, sog. Verbot mit Erlaubnisvorbehalt). Das bedeutet, dass auch gemeinwohlorientierte Angebote wie Bürgerbusse genehmigungsbedürftig sind. Das Genehmigungsverfahren unterliegt den öffentlich-rechtlichen Vorschriften der §§ 9 ff. PBefG und diverser auf Grundlage von § 57 PBefG beruhender Regelungen, wie der Verordnung über den Betrieb von Kraftfahrunternehmen im Personenverkehr, der Straßenbahn-Bau- und Betriebsordnung oder der Berufszugangsverordnung für den Straßenpersonenverkehr. Die Genehmigungen werden zeitlich befristet erteilt.

Genehmigungsfähig sind grundsätzlich nur die im Gesetz regulär vorgesehenen Verkehrsformen (zu den Ausnahmemöglichkeiten sogleich). Das sind der Linien- bzw. Sonderlinienverkehr (§§ 42, 43 PBefG) auf der einen und der Gelegenheitsverkehr (§§ 46 ff. PBefG) auf der anderen Seite. Entgeltliche oder geschäftsmäßige Beförderungsangebote müssen die Merkmale dieser Verkehrsformen erfüllen, sonst können sie nicht zugelassen werden. Daneben gibt es eine Auffangklausel, nach der sogenannte typengemischte Verkehre nach der ihnen ähnlichsten Verkehrsart oder Verkehrsform genehmigt werden können (§ 2 Abs. 6 PBefG i. V. m. der Rechtsgrundlage für die regulär vorgesehene Verkehrsart bzw. Verkehrsform). Zusätzlich kann eine neue Verkehrsart oder ein neues Verkehrsmittel nach § 2 Abs. 7 PBefG befristet genehmigt werden, um sie praktisch zu erproben (Experimentierklausel).

Linienverkehr

295. Linienverkehre stellen die einzige regulär zugelassene Form von Sammelfahrten dar. Sie sind als regelmäßige Verkehrsverbindung definiert, die zwischen bestimmten Ausgangs- und Endpunkten eingerichtet ist. Auf der Strecke müssen Fahrgäste an vorher genau bestimmten Haltestellen ein- und aussteigen können. Damit Gesetzesumgehungen verhindert werden, setzt der Linienverkehr nicht voraus, dass ein Fahrplan mit bestimmten Abfahrts- und Ankunftszeiten besteht oder dass Zwischenhaltestellen eingerichtet sind. Rechtsfolge der Genehmigung als Linienverkehr ist aber die Fahrplanpflicht. Genehmigt werden außerdem allgemein verbindliche Beförderungsentgelte.

Taxen

296. Nur Taxen dürfen sich im öffentlichen Verkehrsraum bereithalten und aus dem laufenden Verkehr herausgewunken werden, um Personen aufzunehmen. Taxen dürfen innerhalb des von der zuständigen Behörde festgelegten Pflichtfahrbereichs grundsätzlich keinen Beförderungsauftrag ablehnen. Sie müssen im Pflichtfahrbereich einen von der zuständigen Behörde festgelegten Tarif erheben (Festtarif). Taxikonzessionen werden nur erteilt, wenn dadurch die Funktionsfähigkeit des Taxigewerbes nicht gefährdet wird. Der Preis einer Taxifahrt wird nicht pro Fahrgast, sondern pro Fahrt festgelegt. Nur der Fahrgast darf entscheiden, ob ein „Sammeltransport“ erfolgt (vgl. § 47 Abs. 1 S. 1 PBefG).

Mietwagen

297. Der Mietwagenverkehr ist in § 49 Abs. 4 PBefG geregelt. Dabei wird die Personenbeförderung mit einem Pkw vorgenommen, der am Betriebssitz des Unternehmers angefordert wird und nach der Fahrt dorthin zurückkehren muss. In einem Mietwagen dürfen nicht einzelne Plätze vermietet werden, sondern nur der Wagen als Ganzes. Der Mietwagen darf nicht wie ein Taxi auf der Straße anhalten und Fahrgäste aufnehmen. Es dürfen nur Fahrten durchgeführt werden, deren Zweck, Ziel und Ablauf der Fahrgast bestimmt.

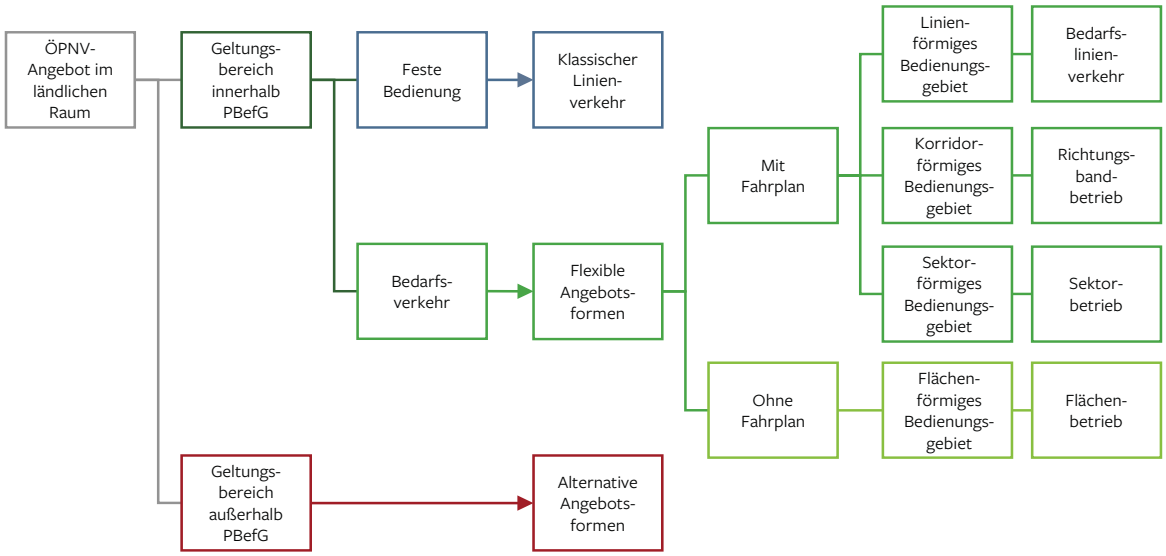
Zweck der Regulierung der Personenbeförderung

298. Zweck der Regulierung ist es, dass Sicherheit und Ordnung nach Maßgabe der öffentlichen Verkehrsinteressen aufrechterhalten werden. Außerdem soll die möglichst optimale Gestaltung des ÖPNV gewährleistet werden (HEINZE et al. 2014, Rn. 2). Weiterer Sinn der Regelungen des PBefG ist es, die verschiedenen Beförderungsformen voneinander abzugrenzen. Linien-, Taxi- und Mietwagenverkehr sollen unterschieden werden, weil sie verschiedenen Zwecken dienen und sich nicht gegenseitig Konkurrenz machen sollen, damit sie ökonomisch tragfähig sind. Flexible Bedienformen sind im Gesetz nicht definiert, werden aber in der Praxis überwiegend als typengemischte Verkehre genehmigt (zur Systematik: Abb. 5-6).

Vorabfassung - wird durch die endgültige Fassung ersetzt.

Abbildung 5-6

Differenzierung der Angebotsformen (einschließlich flexibler Angebotsformen)



Quelle: SOMMER et al. 2016, S. 40, angepasst

299. Alternative Angebotsformen, verstanden als Verkehrsdienstleistungen, die nicht mit professionellen Fahrerinnen bzw. Fahrern erfolgen (SOMMER et al. 2016, S. 41), unterliegen nicht dem PBefG, solange sie nicht entgeltlich oder geschäftsmäßig erfolgen (§ 1 Abs. 1 PBefG). Sobald dies der Fall ist, können sie bislang nur als befristete Ausnahme genehmigt werden.

Reformmöglichkeiten

300. Strittig ist, inwiefern das PBefG reformbedürftig ist, um neue Verkehrsformen wie das Rideselling auch im kommerziellen Rahmen zu ermöglichen. Unter Rideselling wird das Anbieten von Fahrten in einem privaten Pkw verstanden, wobei der Fahrgast bestimmt, ob und mit welchem Ziel eine Fahrt unternommen wird. Die Vermittlung von Fahrgästen an die Fahrerin bzw. den Fahrer erfolgt über eine Online-Plattform (Tz. 293). HAUCAP et al. (2015) sind der Auffassung, dass die Taxi- und Mietwagenmärkte weitgehend dereguliert werden sollten, um Angebote wie Uber zuzulassen. Sie sehen zahlreiche Vorteile in einer solchen Deregulierung. Ihrer Meinung nach würde der Markteintritt neuer Verkehrsdienstleister den Wettbewerb intensivieren, was zu einer Ausweitung des Angebots und geringeren Preisen führen würde. Sie sehen es außerdem als vorteilhaft an, dass Fahrzeugführende und Fahrgäste einander nach Beendigung der Fahrt bewerten können, was zur Markttransparenz beitragen würde. Der Markt, die Preise und das Angebot in Randstunden würden sich weiter ausdifferenzieren. Vorteile werden zudem in ökologischer Hinsicht gesehen, weil Carsharing- und Ridesharing-Angebote dazu führen können, dass weniger Autos gekauft bzw. gefahren werden (ebd., S. 41 f.).

Einer Änderung des PBefG widmet sich auch ein noch nicht veröffentlichtes Gutachten für das BMVI (RODI und SCHÄFER-STRADOWSKY 2017), das mögliche umfassende Änderungen des PBefG geprüft hat und entsprechende Ausgestaltungsoptionen vorschlägt. Unter anderem kann danach die Ortskundeprüfung für Taxi- und Mietwagenverkehre abgeschafft und die Tarifpflicht für Taxen sowie die Rückkehrpflicht von Mietwagen dereguliert werden. Zudem wird vorgeschlagen, digitale Mobilitätsplattformen, die selbst Beförderungsleistungen erbringen, in einer eigenen Norm im PBefG zu benennen und deren Genehmigungsvoraussetzungen festzulegen, um so den spezifischen Regulierungsbedarf abbilden sowie verkehrslenkende Aspekte berücksichtigen zu können (ebd.).

301. Gegen die in beiden Gutachten angenommenen Vorteile einer Deregulierung lassen sich allerdings durchaus Einwände vorbringen. Es besteht der Verdacht, dass die Preisvorteile, die kommerzielle Ridesharing-Angebote gegenwärtig haben, zum Teil auch aus einem Unterlaufen von gesetzlichen Vorschriften zu Scheinselbstständigkeit, Mindestlohn und Sicherheitsfragen resultieren. Ein verstärkter Wettbewerb könnte zunächst die Preise sinken lassen, aber langfristig dazu führen, dass nur noch eine Plattform (wie Uber) den Markt monopolisiert und dann

Vorabfassung - wird durch die endgültige Fassung ersetzt.

die Preise wieder anheben kann. Eine Untersuchung, die 2003 die Deregulierung von Taximärkten verglichen hat, kam zu dem Ergebnis, dass die Preise nicht notwendigerweise fallen, sondern sich vor allem ausdifferenzieren und – gerade in ländlichen Gegenden – steigen. Die Untersuchung zeigt zudem auf, dass in den Märkten, die dereguliert wurden, in der Regel später wieder Qualitätsanforderungen an die Verkehrsunternehmen eingeführt wurden (BEKKEN und LONGVA 2003). Es ist auch möglich, dass die Ausweitung von Fahrten gerade in der Stadt zu Rebound-Effekten und damit zu mehr Verkehr führt (WOLF und NIEMANN 2017).

Die Preisbildung erfolgt insbesondere bei Uber auch nicht transparent, weil der Preis weder von den Fahrenden noch von denen, die mitfahren, gesetzt, sondern von Uber festgelegt wird und kurzfristig stark schwanken kann. Die Plattform legt nicht offen, wie sich der Preis für eine Fahrt errechnet. Die Bewertung von Fahrzeugführenden und Fahrgästen hätte nicht nur Vor- sondern auch Nachteile. Neben der Frage, ob der „gläserne" Dienstleister und die „gläserne" Kundschaft grundsätzlich erstrebenswert sind, können sich auch Datenschutzprobleme ergeben. Zudem könnte die Bewertung missbraucht werden oder dazu führen, dass es Fahrgäste gibt, die gar nicht mehr transportiert werden, weil sie schlechte Bewertungen bekommen haben.

302. Eine sehr weitgehende Deregulierung kann vor allem nicht nur Auswirkungen auf das Taxigewerbe haben, sondern auch Folgen für den (städtischen) ÖPNV. Wenn eine Deregulierung dazu führt, dass Angebote wie Uber sowohl dem Taxi als auch dem ÖPNV Konkurrenz machen, kann dies zur Folge haben, dass sich beide Systeme (noch schlechter als bisher) finanzieren können. Ein Rückgang des städtischen ÖPNV ist jedoch vor dem Hintergrund der Verkehrswende nicht wünschenswert, zumal private Unternehmen kein staatliches Angebot darstellen und keine Aufgaben der Daseinsvorsorge übernehmen. Das bedeutet auch, dass die privaten Unternehmen nicht verpflichtet sind, Mobilität grundsätzlich zu gewährleisten, sondern sich darauf beschränken können, die Fahrten zu übernehmen, die profitabel sind. Dies kann zu einem Nachfragerückgang beim ÖPNV führen. Unprofitable Strecken müssten aber weiter vom ÖPNV abgedeckt werden und dann noch teurer refinanziert werden, was wiederum zu einer weiteren Verschiebung zu privaten Angeboten führt (Tz. 202). Außerdem sind auf nachfragestarken Strecken aus verkehrlichen und ökologischen Gründen große Fahrzeuge wie Busse, die viele Menschen transportieren können, vielen kleinen Fahrzeugen vorzuziehen. Weitere Folge könnte eine Zunahme von Pkw-Fahrten in den Innenstädten mit negativen Folgen (Überforderung von Straßenkapazitäten, Stau, Behinderung von Bussen) sein. Für den ländlichen Verkehr lässt eine vollständige Deregulierung der Personenbeförderung keine Lösung dafür erwarten, dass die Verkehre zu dispers sind, um sinnvoll gebündelt zu werden, und Nachfrage sowie Fahrstrecken auch kaum eine wirtschaftliche Lösung durch bedarfsorientierte Angebote erwarten lassen.

Lehnt man eine vollständige Deregulierung ab, läge ein Mittelweg darin, alternative bzw. flexible Angebotsformen in den ÖPNV zu integrieren. KARL et al. (2017) schlagen in einem Gutachten eine Fortentwicklung des Personenbeförderungsrechts vor. Auf der Basis von Erfahrungen mit alternativen Angebotsformen empfehlen sie, die flexible Bedienung als Teil des ÖPNV zu ermöglichen. Dazu sollten vor allem die Voraussetzungen für eine sichere Genehmigungsfähigkeit der (klassischen) flexiblen Angebotsformen (s. Abb. 5-6) geschaffen werden. Gegenwärtig stoßen wie dargestellt flexible Angebote im existierenden PBefG-Rahmen auf Probleme. Dies hat zur Folge, dass die flächenhafte Bedienung mit Bussen derzeit faktisch weder als linienverkehrsähnlich noch als mietwagenähnlich genehmigungsfähig ist. Zudem sollen gezielt Taxen in solchen Gebieten als Teil des ÖPNV zugelassen werden, in denen eine reguläre Versorgung mit dem Linienverkehr aufgrund der dispersen Verkehre nicht mehr möglich ist. Dies hätte den Vorteil, dass die Versorgung flexibel und angebotsorientiert aufrechterhalten werden könnte, ohne dass durch eine Konkurrenz zum regulären ÖPNV oder Taxigewerbe die öffentlichen Verkehre weiter geschwächt würden. Rechtlich würde das bedeuten, dass die Regelung in § 8 Abs. 2 PBefG dahingehend ergänzt werden müsste, dass bedarfsgesteuerte Verkehre mit Pkw oder Bussen unter Bedienung vorhandener Haltestellen dem ÖPNV zugerechnet werden, wenn diese die zeitliche oder räumliche Verfügbarkeit des ÖPNV verbessern oder an seine Stelle treten. Somit würde eine Einbindung in den öffentlichen Dienstleistungsauftrag erfolgen oder ein separater Auftrag vergeben werden. Damit könnte das gerade in der Fläche oftmals in seiner Existenz bedrohte Taxigewerbe gestützt werden und gleichzeitig die Verfügbarkeit von Fahrten im ländlichen Raum verbessert werden (KARL et al. 2017, S. 51–53). Daneben empfehlen die Autorinnen und Autoren, die Experimentierklausel im PBefG so fortzuentwickeln, dass erfolgreiche Experimente über die bisherige Beschränkung auf vier Jahre hinaus verstetigt werden können. Über erfolgreiche und gescheiterte Experimente auf der Basis der Experimentierklausel soll zudem ein regelmäßiger Bericht erstellt werden, der es

Vorabfassung - wird durch die endgültige Fassung ersetzt.

erlaubt, das PBefG in der Zukunft fortzuentwickeln (ebd., S. 53–55).

303. Vergleichbar ist der Vorschlag, das PBefG auf Verkehrsarten mit eigener Fahrleistung der betroffenen Personen auszuweiten. Insbesondere wird vorgeschlagen, Carsharing als Verlängerung des ÖPNV als Angebot der Kommunen in den Nahverkehrsplan zu integrieren. Das würde ein intermodales Angebot durch die Kommunen ermöglichen und die Integration der Verkehrsträger fördern. Der lokal beauftragte ÖPNV-Betreiber könnte so das bestehende Netz und die Fahrpläne des liniengebundenen ÖPNV-Angebots mit den Carsharing-Angeboten verzahnen. Allerdings besteht dann die Gefahr, dass durch den Vorrang der eigenwirtschaftlichen Verkehre die Vorgaben zu intermodalen Angeboten übergangen werden können. Daher wird vorgeschlagen, ausdrücklich Vorgaben des Aufgabenträgers zur Umsetzung der Verkehrswende in den Wesentlichkeitskatalog von § 13 Abs. 2a S. 4 und 5 PBefG aufzunehmen, um so sicherzustellen, dass diese Kriterien bei der Vergabe von Angeboten berücksichtigt werden müssen (JUNG 2017).

Daneben sollte die genehmigungsfreie Mitnahme eindeutig geregelt werden, um ehrenamtliches Engagement im ländlichen Raum zu ermöglichen. Insbesondere sollte eine typisierende Festlegung der zulässigen Erlöse in Cent pro Kilometer durch das zuständige BMVI als Verordnungsgeber erfolgen. Damit könnten die Unsicherheiten, die in dieser Hinsicht entstanden sind, vermieden werden und die Gerichte würden von dieser Aufgabe entlastet (KARL et al. 2017, S. 50 f.).

Die Diskussion über eine Novelle des Personenbeförderungsgesetzes wird in dieser Legislaturperiode verstärkt geführt werden. Eine Anpassung des Rechts scheint aus Sicht des SRU angezeigt. Allerdings sollte sie in einer Form erfolgen, die sicherstellt, dass Mobilitätsplattformen nicht lediglich auf Kosten des städtischen ÖPNV profitieren und nicht gleichzeitig soziale Standards der Beschäftigten massiv abgebaut werden.

5.10 Digitalisierung und autonomes Fahren

304. Die breite Markteinführung autonomer Fahrzeuge liegt noch in der Zukunft, umso wichtiger ist es jedoch, sich bereits jetzt mit den möglichen auch negativen Folgewirkungen zu beschäftigen. Wie in Abschnitt 4.5.2 dargelegt, sind die genauen verkehrlichen und ökologischen Auswirkungen des autonomen Fahrens von vielen Parametern abhängig, die heute noch nicht zweifelsfrei vorhersehbar sind. Neben die Elektrifizierung und die Automatisierung sollte als dritter Mobilitätstrend die Shared Mobility treten (FULTON und MEROUX 2017) – nur so können unerwünschte Folgen wie Rebound-Effekte effektiv begrenzt und das transformative Potenzial der Digitalisierung gehoben werden. Dazu bedarf es einer Politik, welche den digitalen Wandel proaktiv gestaltet und einen verlässlichen Rahmen setzt. Viele der in diesem Kapitel bereits vorgeschlagenen Maßnahmen, wie die streckenabhängige Pkw-Maut oder die Einführung einer Geschwindigkeitsbeschränkung auf Autobahnen, sind gerade auch in Anbetracht der möglichen drastischen Zunahme der Verkehrsleistung durch das autonome Fahren von zentraler Bedeutung.

305. Zusätzlich können jedoch eine Reihe weiterer Einzelmaßnahmen auf Bundes- und Landesebene sowie in den Kommunen helfen, die Chancen der digitalen Transformation zu nutzen. Bereits heute gibt es Bestrebungen, ein deutschlandweit gültiges Ticket für den öffentlichen Verkehr einzuführen. Von entscheidender Bedeutung wird es dabei sein, auch Angebote wie kommunale Fahrradverleihsysteme sowie Car- und Ridesharing unter Berücksichtigung des Grundsatzes der Datensparsamkeit in die Ticketing-Plattform zu integrieren, sodass die intermodale Nutzung verschiedener Verkehrsträger auch für die erste und letzte Meile erleichtert wird. Als Vorbild kann hierfür die niederländische Karte für den elektronischen Zahlungsverkehr (OV-chipkaart) dienen. In einer solchen Vision eines flexibilisierten und individualisierten öffentlichen Verkehrs (LENZ und FRAEDRICH 2015, S. 89) werden die kommunalen Nahverkehrsunternehmen zu zentralen Mobilitätsdienstleistern.

Mit der zunehmenden Nutzung autonomer Fahrzeuge in privatem Eigentum steigt das Risiko, dass Nutzende in Zonen mit Parkgebühren geneigt sein könnten, ihre Pkw fahrerlos in Gebiete außerhalb dieser Zonen zu navigieren und dort kostenfrei parken zu lassen. In der Folge würden Leerfahrten ansteigen und die gewünschte Lenkungswirkung der Parkraumbewirtschaftung nachlassen. Eine flächendeckende Parkraumbewirtschaftung in Städten kann helfen, dies zu vermeiden und weitere Anreize für die Nutzung des Umweltverbundes sowie Car- und Ridesharing zu geben. Auch die Einführung einer streckenabhängigen Pkw-Maut (s. Kap. 5.6) kann dazu beitragen Rebound-Effekte aufzufangen (FOLJANTY und DUONG 2016, S. 48).

Vorabfassung - wird durch die endgültige Fassung ersetzt.

Sollten Car- und Ridesharing einen nennenswerten Anteil am Verkehrsaufkommen bei gleichbleibender Nutzung des öffentlichen Verkehrs in den Städten erreichen, geht dies mit einer drastischen Verringerung der notwendigen Fahrzeuge und damit auch der benötigten Parkflächen einher (ITF 2016). Die Kommunen sollten diese ökologische Flächendividende nutzen, um Raum für Grünflächen und den Umweltverbund (insb. Fahrräder) zu schaffen und damit einen Beitrag zu einer qualitätsvollen Innenentwicklung zu leisten. Außerdem sollten Kommunen in einem solchen Fall Haltezonen für autonome Fahrzeuge ausweisen, um dem Zu- und Ausstieg in zweiter Reihe vorzubeugen.

306. Der Forschungsbedarf zum autonomen Fahren ist immens und reicht von primär technischen über Akzeptanzfragen bis hin zu juristischen Fragen der Regulierung. Ökologische Fragestellungen werden dabei häufig unter der Vermutung untersucht, dass die erhöhte Energieeffizienz autonomer Fahrzeuge zu einem Rückgang des CO_2-Ausstoßes des Verkehrs führen wird. So sieht die „Strategie automatisiertes und vernetztes Fahren" der Bundesregierung (Bundesregierung 2015) technische Potenziale zur Steigerung der Verkehrseffizienz und zur Reduzierung mobilitätsbedingter Emissionen durch autonome Fahrzeuge (Abschn. 4.5.2), lässt mögliche negative Auswirkungen aber unerwähnt. Auch in den Forschungsprogrammen der Ministerien (BMVI 2016b; BMBF 2017) spielt die Untersuchung möglicher verkehrlicher Rebound-Effekte, das Potenzial von Shared Mobility wie Ridesharing und das zukünftige Zusammenspiel mit dem ÖPNV als möglichem integrierten Mobilitätsdienstleister bisher keine sichtbare Rolle. Positiv ist zu werten, dass sich diese Forschungsfragen im Bericht der AG Forschung des Runden Tisches Automatisiertes Fahren des BMVI wiederfinden. Wie in Abschnitt 4.5.2 dargelegt wurde, wird gerade in diesem Spannungsfeld entschieden, ob das autonome Fahren seine ökologischen Versprechen einlösen kann. Angesichts der Unsicherheiten und rapiden technischen Entwicklung bedarf es daher vermehrter Forschung über die Bedingungen, unter denen die Digitalisierung der Mobilität und insbesondere das autonome Fahren zu einem nachhaltigen Verkehrssystem beitragen können.

5.11 Instrumente zur Stärkung des Schienenverkehrs

307. Die Schiene ist bereits heute ein energieeffizienter und vergleichsweise klimaverträglicher Verkehrsträger. Im Zuge weiterer Streckenelektrifizierungen und einer fortschreitenden Dekarbonisierung der Stromversorgung wird sich die Klimabilanz des Schienenverkehrs weiter verbessern. Durch seine Stärkung und die Verlagerung von Verkehren, vor allem von der Straße auf die Schiene, können somit Treibhausgasemissionen und Energieverbrauch reduziert werden.

308. Potenziale zur Emissionsminderung durch eine Verlagerung werden insbesondere im Bereich des Güterverkehrs gesehen. Konkret sollte der Modal-Split-Anteil der Schiene im Güterverkehr bis zum Jahr 2050 auf mindestens 30 % erhöht werden. Das Szenario der UBA-Studie „Klimaschutzbeitrag des Verkehrs bis 2050", in dem Pfade zu einem treibhausgasneutralen Verkehr untersucht werden, geht von einem Schienenanteil an der Güterverkehrsleistung von 30,7 % im Jahr 2050 aus (BERGK et al. 2016, S. 170).

Ausgangspunkt für Überlegungen zur Erreichung dieses Ziels in Deutschland können Erfahrungen sein, die in anderen Ländern damit gemacht wurden, Güter stärker auf die Schiene zu verlagern. In der Schweiz wird der Betrieb und Einsatz von Lkw durch die leistungsabhängige Schwerverkehrsabgabe, das heißt eine Lkw-Maut auf allen Straßen, und eine hohe Mineralölsteuer für Dieselfahrzeuge finanziell stark belastet. Ein großer Teil der Mittel aus der Schwerverkehrsabgabe sowie ein Teil des Aufkommens aus der Mineralölsteuer werden zum Betrieb, Substanzerhalt und Ausbau der Schieneninfrastruktur verwandt. Außerdem werden Mineralölsteuermittel für die Finanzierung des Kombinierten Verkehrs (KV) und die Förderung von Gleisanschlüssen eingesetzt. (SUTTER et al. 2016, S. 36). Eine solche Gleisanschlussförderung ist essenziell für die Aufrechterhaltung des Einzelwagen- bzw. Einzelladungsnetzwerkes und damit eines wesentlichen Marktsegments des Schienengüterverkehrs. Österreich hat sich das Ziel gesetzt, dass 40 % des Güterverkehrs bis 2025 auf der Schiene stattfindet. Zu diesem Zweck wird der Infrastrukturausbau der Bahn stark gefördert. Es existieren zwei Förderprogramme, die marktreife KV-Technologien einerseits und Forschung andererseits unterstützen (LOBIG et al. 2016, S. 11).

309. In Deutschland existiert eine Vielzahl an Hemmnissen, die verhindern, dass die Schiene in größerem Umfang für den Gütertransport genutzt wird. Dazu zählen insbesondere eine erodierende Angebotsqualität des Bestandsnetzes aufgrund der Stilllegung und des Rückbaus von Gleisanschlüssen, der verbesserungswürdige Ausbauzustand der Infrastruktur, welcher zu verlängerten Transportzeiten und Verspätungen führt, eine mangelnde

Vorabfassung - wird durch die endgültige Fassung ersetzt.

Intermodalität in den Transportketten und mangelnde Innovationen bei den Güterwagen. Insgesamt zeigt sich der Sektor bislang nicht ausreichend innovationsfähig. Dies hat nach Auffassung von Expertinnen und Experten die Ursache, dass an vielen Stellen eine schrittweise technische Erneuerung dadurch erschwert wird, dass Innovationen mit dem restlichen System nicht kompatibel und deshalb die Hürden für die Einführung hoch sind. Außerdem kann ein Akteur, der das Risiko und auch die finanziellen Investitionsmittel für eine Innovation übernimmt, nicht sicherstellen, dass er auch vom Nutzen der Innovation profitieren kann. Überdies deckt die deutsche Förderung den Zwischenschritt der umfangreichen Anwendung von Prototypen in Feldtests, die vorherige und abschließende Durchführung von umfangreichen Wirtschaftlichkeits- und Machbarkeitsstudien und eine Unterstützung bei der Hochskalierung der Technologie Richtung Markteinführung nicht ab (LOBIG et al. 2016, S. 39 f.).

Neben dem Substanzerhalt des Bestandsnetzes ist der wohl wichtigste Aspekt für den Schienenverkehr der Ausbau der Schieneninfrastruktur hinsichtlich einer Kapazitätserhöhung auf hochfrequentierten Streckenabschnitten und an wichtigen Knotenpunkten. Die Schieneninfrastruktur muss durch den Ausbau dieser Knoten sowie durch den Aufbau bzw. die Verlängerung entsprechender Überholgleise für Güterzüge von 740 m Länge ertüchtigt werden (HOLZHEY 2010). Darüber hinaus sollten die wichtigen Schienenausbauprojekte im BVWP als vordringlicher Bedarf ausgewiesen werden. Der Ausbau der Infrastruktur wird mit hohen Kosten verbunden sein (WINKLER et al. 2016). Die Planungen des aktuellen BVWP 2030 sind ein erster Schritt zu einer nachhaltigen Kapazitätserweiterung des Schienennetzes; hier wird das gesamte Volumen der überregionalen Aus- und Neubauvorhaben der Schieneninfrastruktur auf rund 40 Mrd. Euro bis 2030 veranschlagt (GRATZA 2016).

310. Allerdings sind Infrastrukturverbesserungen am Schienennetz allein nicht ausreichend, um den Modal Split des Schienengüterverkehrs deutlich zu erhöhen (LOBIG et al. 2016, S. 14). Es müssen auch ausreichend Möglichkeiten zur Verfügung stehen, Güter auf die Schiene zu verladen. Die Zahl der Güterbahnhöfe, Ladegleise und Gleisanschlüsse ist aber in den letzten Jahren eher zurückgegangen (HÖFT 2016, S. 21). Terminals für den KV sind zwar nicht geschlossen worden, operieren aber an der Kapazitätsgrenze (LOBIG et al. 2016, S. 77). Es ist daher erforderlich, die Förderung für Gleisanschlüsse zu erhalten und unbürokratisch zu gestalten. Darüber hinaus sollte die bestehende KV-Förderung beibehalten und auf alternative Umschlagtechnologien ausgeweitet werden. Zukunftsträchtige Technologien beim Rollmaterial, wie beispielsweise der „intelligente“ Güterwagen oder auch die bereits seit Jahrzehnten erprobte automatische Mittelpufferkupplung, sollten ebenfalls eine verstärkte Förderung erfahren, um die Kosteneffizienz der Produktionsprozesse im Schienengüterverkehr zu verbessern und somit dessen relative Wettbewerbsfähigkeit zu stärken. Der Masterplan Schienengüterverkehr greift einige dieser Aspekte auf (Allianz pro Schiene et al. 2017).

Auch für den Schienenpersonenverkehr sind Kapazitätserweiterungen erforderlich, um umweltpolitisch sinnvolle Verlagerungswirkungen vom MIV und Luftverkehr erreichen zu können. Im Schienenpersonennahverkehr (SPNV) müssen die Aufgabenträger zurzeit noch erhebliche Mengen ihrer Leistung mit Dieseltraktion bestellen, da bisher nur rund 60 % des gesamten Schienennetzes der DB elektrifiziert sind. 2016 wurden 240 Mio. Zugkilometer per Dieseltraktion erbracht, was circa 36 % der Gesamtleistung des SPNV entspricht, zuzüglich circa 20 Mio. Zugkilometer für Zuführungsfahrten. Eine rasche und umfassende Elektrifizierung von Nebenstrecken ist aus klimapolitischen Erwägungen heraus geboten. Aus einem verlässlichen Ausbauplan für die weitere Elektrifizierung können auch verbleibende Einsatzfelder für alternative Antriebe auf der Schiene in Form von batterieelektrischen oder Brennstoffzellenfahrzeugen abgeleitet werden (vgl. „Bahn-Elektrifizierung endlich vorantreiben“, Pressemitteilung der Bundesarbeitsgemeinschaft Schienenpersonennahverkehr vom 14.07.2017).

Um ein attraktives Angebot im Schienenpersonenverkehr zu gewährleisten, ist eine weitere enge Verzahnung von Fahrplänen mit optimierten Fahr- und Umsteigezeiten im ÖPNV, SPNV und Schienenpersonenfernverkehr (SPFV) erforderlich. Das Fernverkehrsangebot auf der Schiene sollte durch eine bessere Abdeckung der Fläche, mehr Direktverbindungen, einen höheren Takt und günstige Preise für Basisangebote verbessert werden (vgl. BERGK et al. 2016, S. 132). Für eine Qualitätsverbesserung des SPFV-Angebots scheint auch ein integraler Taktfahrplan, der sogenannte Deutschland-Takt geeignet. In diesem System sind die Ankunfts- und Abfahrtszeiten so synchronisiert, dass an Umsteigebahnhöfen Züge in alle Richtungen etwa zeitgleich ankommen und abfahren. Mit einem solchen Fahrplan können Reisende an den Taktknoten ohne Wartezeiten in alle Richtungen umsteigen (NORDENHOLZ et al. 2016, S. 30). Machbarkeitsstudien zeigen, dass die Grundzüge eines integrierten Taktfahrplans unter Zugrundelegung der erwarteten Infrastruktur

Vorabfassung - wird durch die endgültige Fassung ersetzt.

des Jahres 2025 allein durch betriebliche Optimierung umsetzbar wären (vgl. ebd., S. 32). Dennoch sollte bei weiteren Netzplanungen von Schieneninfrastruktur im Rahmen des BVWP besonders auf Kompatibilität zu einem integralen Taktfahrplan geachtet werden.

311. Der Modal Split wird auch durch die relativen Kosten der verschiedenen Verkehrsmittel beeinflusst. Sowohl die Gestaltung von Steuern und Abgaben auf den Energieverbrauch (z. B. Belastung von Fahrstrom) als auch die Bepreisung der Infrastrukturnutzung (z. B. Trassenpreise im Schienenverkehr) müssen auf Kostengerechtigkeit sowie Konsistenz mit den Klimazielen geprüft und gegebenenfalls angepasst werden. Insbesondere eine (ggf. durch erhöhte Einnahmen aus dem Straßenverkehr querfinanzierte) Absenkung der Trassenpreise kommt als Hebel für eine Verlagerung der Verkehrsleistung vom Straßen- auf den Schienenverkehr infrage.

5.12 Instrumente für einen klimaneutralen Seeschiffsverkehr

312. Der Seeschiffsverkehr unterscheidet sich in vielen Punkten von landgebundenen Verkehren. Global gültige Regelungen werden im Rahmen der International Maritime Organization (IMO) verabschiedet. Mitglieder der IMO als Organisation der Vereinten Nationen sind die Nationalstaaten mit ihren spezifischen Interessen, sodass Verhandlungen über gemeinsame Standards lange Zeit in Anspruch nehmen und nicht immer das erforderliche Ambitionsniveau erreichen. Auch verfügen viele der weniger entwickelten Staaten nicht über ausreichende Ressourcen, um die Einhaltung von Standards zu kontrollieren und umzusetzen (RAHIM et al. 2016, S. 162). Die Nutzungsdauer von Seeschiffen beträgt 30 und mehr Jahre, das Durchschnittsalter der Welthandelsflotte liegt bei 15 Jahren (VDR 2017a). Hinzu kommt das hohe Maß an Internationalität und Komplexität aufgrund der vielen eingebundenen Akteure und Institutionen. Es werden Güter global über weite Strecken transportiert und auf einer Reise Häfen in unterschiedlichen Staaten angelaufen. Auch die Eigentums- und Nutzungsverhältnisse in der Seeschifffahrt sind nicht mit denen an Land vergleichbar. Der Neubau eines Seeschiffes ist im Vergleich zum Lkw oder Pkw mit erheblichen Investitionen verbunden. Auch aus diesem Grund wurden viele Schiffe in der Vergangenheit durch Schiffsfonds finanziert und an Reedereien verchartert; mit der Finanzmarktkrise gerieten auch die Fonds in eine Krise.

Da auf Schiffen das Recht des Flaggenstaats gilt, werden Schiffe vor allem aufgrund niedrigerer Sozialstandards (Arbeits- und Tarifrecht, Bemannungsvorschriften) und damit verbundenen geringeren Kosten ausgeflaggt und in Staaten mit geringeren Standards registriert. Dabei legt das Seearbeitsübereinkommen (Maritime Labour Convention) von IMO und ILO (International Labour Organization) Mindeststandards fest. Das 1989 in Deutschland eingeführte internationale Seeschifffahrtsregister („Zweitregister“) ermöglicht auch Schiffen in deutschem Eigentum unter bestimmten Bedingungen das Führen einer anderen Flagge (§ 7 Flaggenrechtsgesetz). Ende September 2017 fuhren 656 deutsche Handelsschiffe unter der Flagge von Antigua und Barbuda und 650 unter Liberianischer Flagge (BSH 2017). Demgegenüber hat die Zahl der Seeschiffe unter deutscher Flagge kontinuierlich abgenommen, von 699 Schiffen zum Gütertransport im Jahr 1998 auf 246 im Jahr 2015 (BMVI 2016d, S. 68 f.). Dennoch spielt Deutschland eine bedeutende Rolle, da sich ein erheblicher Teil der Welthandelsflotte in deutschem Eigentum befindet: nach Eigentümern aus Griechenland, Japan und China steht Deutschland an vierter Stelle (VDR 2017a; UNCTAD 2014, S. 38).

313. Die technischen Lösungen zur Dekarbonisierung im Seeschiffsverkehr liegen in der Nutzung alternativer Kraftstoffe sowie operativer Maßnahmen zur Steigerung der Effizienz, bei neu gebauten Schiffen auch in einer Verbesserung des Schiffsdesigns. Steigende Anforderungen an Energieeffizienz, Treibhausgasreduktion und Schadstoffminderung an Seeschiffen sowie der Einsatz neuer Antriebstechnologien sind mit erheblichen Investitionen verbunden. Ähnlich wie im Mietsegment des Gebäudebereichs besteht dabei ein Investor-Nutzer-Dilemma: Die Schiffseigner tragen die Investitionen, den Nutzen hat der Charterer durch geringere Energiekosten und gegebenenfalls verminderte Hafengebühren aufgrund eines hohen Environmental Ship Index (ESI). Gleichzeitig besteht aufgrund von großen Überkapazitäten und niedrigen Charterraten kaum ein Anreiz, Investitionen zu tätigen, die über den verpflichtenden Standard hinausgehen, da die Refinanzierung nicht gesichert werden kann. In der gegenwärtigen Situation sind daher Anreize für den Einsatz emissionsarmer Kraftstoffe erforderlich. Darüber hinaus muss auch die Infrastruktur aller Häfen die Nutzung dieser Kraftstoffe ermöglichen.

Vorabfassung - wird durch die endgültige Fassung ersetzt.

Vorabfassung - wird durch die endgültige Fassung ersetzt.

Finanzmarkt als Hemmnis für die Erneuerung der Flotte

314. Die große Bedeutung Deutschlands für die Welthandelsflotte geht nicht nur auf traditionelle Reedereien als Eigentümer der Schiffe, die diese auch bereedern oder selbst nutzen, zurück, sondern auch auf Schiffsfonds. Lange Zeit waren Schiffsfonds als Anlageobjekt attraktiv, da sie aufgrund der über Jahre stetig zunehmenden globalen Wirtschaftsleistung und damit verbundener Handelsströme als sichere Kapitalanlage mit hohen Renditen angesehen wurden. Zudem galten in Deutschland für Anlegerinnen und Anleger sowie Reedereien vorteilhafte Besteuerungsregeln. Daher boten vor allem deutsche Banken, aber auch Reedereien, Schiffsfonds an. So wurde die Münchener CONTI Reederei 1970 unter dem Namen Cosima Reederei nicht als klassische Reederei gegründet, sondern bot von Beginn an Schiffsbeteiligungen an (CONTI 2017).

Durch die Wirtschafts- und Finanzmarktkrise gerieten auch die Schiffsfonds und mit ihnen die sie anbietenden Banken und darauf ausgerichtete Reedereien in die Krise. Die Finanzmarktkrise hat jedoch auch insgesamt dazu beigetragen, dass die kreditbasierte Finanzierung der Seeschifffahrtsflotte erschwert ist, sodass der technologisch vorteilhafte Erneuerungszyklus mit geringerer Geschwindigkeit vonstattengeht.

Die hohen Anlagesummen der Schiffsfonds führten zu einer erheblichen Anzahl neu gebauter Schiffe, vor allem auch mit zunehmender Größe (s. Tz. 90), sodass sich, angetrieben durch die Abnahme des globalen Wirtschaftswachstums und der Handelsströme, zusätzliche Überkapazitäten entwickelten. Diese prägen weiterhin den Markt und führen zu niedrigen Fracht- und Charterraten. Es wird davon ausgegangen, dass sich ein Ausgleich von Angebot und Nachfrage erst langfristig durch steigenden Handel und einen Abbau der Kapazitäten einstellen wird (BMWi 2017, S. 10).

5.12.1 Nationalstaatliche Zuordnung der Treibhausgasemissionen des Seeschiffsverkehrs

315. Die Frage, welchem Staat welche Treibhausgasemissionen aus der Seeschifffahrt zugeordnet werden, ist ungelöst. Bislang konnte hierzu international kein Konsens erzielt werden. Eine Zuordnung der Schiffsemissionen etwa nach Flaggen würde jedoch die Emissionen einiger Entwicklungsländer wie Liberia oder Antigua und Barbuda deutlich ansteigen lassen, ohne dass dem eine entsprechende Wirtschaftskraft gegenüberstünde. Es ist daher davon auszugehen, dass eine Zuordnung der Emissionen aus der Seeschifffahrt auf Basis der Flagge im Rahmen internationaler Klimaverhandlungen oder in der IMO geringe Erfolgsaussichten haben.

Auch andere mögliche Zuordnungen, wie Sitz der Eigner, Umschlag in den Häfen oder Fahrten in territorialen Gewässern scheinen nicht geeignet, um Emissionen einzelnen Staaten zuzuordnen. So würden sich nach Daten des dänischen Umweltrates die Treibhausgasemissionen Dänemarks verdoppeln, lägen die Emissionen dänischer Reedereien, die 10 % des Welthandelsvolumens transportieren, zugrunde. Der hohe Anteil geht insbesondere auf die dänische Maersk Line zurück, die weltweit über die größten Frachtkapazitäten verfügt (RAHIM et al. 2016, S. 163). Bezogen auf die Emissionen der Seeschifffahrt in dänischen Küstengewässern stiegen die Emissionen um etwa 15 %. Würde als Basis der Umschlag in dänischen Häfen angenommen, nähmen die Emissionen dagegen lediglich um etwa 5 % zu (The Danish Ecocouncil 2011, S. 7).

Aufgrund der methodischen Schwierigkeiten sind die Treibhausgasemissionen der Seeschifffahrt auch weiterhin nicht in Emissionsminderungsziele internationaler Klimaabkommen integriert. Ein im Zuge der Klimakonferenz in Kopenhagen (COP 15) initiierter Prozess zur Erarbeitung verbindlicher Instrumente wurde auf der 60. Sitzung des Marine Environment Protection Committee (MEPC) der IMO abgelehnt (RAHIM et al. 2016, S. 160). Einer der Gründe für diesen Mangel an Regulierung liegt auch in den angewandten unterschiedlichen Prinzipien. Während sowohl beim Kyoto-Protokoll als auch beim Klimaabkommen von Paris die Leistungsfähigkeit der Nationalstaaten berücksichtigt wurde (sog. Common but Differentiated Responsibility), gelten die in der IMO verabschiedeten Grundsätze und Regularien für alle Mitgliedstaaten (No More Favourable Treatment; zur Eräuterung s. a. SHI 2016, S. 125). Allerdings ist der Klimaschutzbeitrag der Seeschifffahrt insbesondere seit den Pariser Klimaverhandlungen Thema des MEPC, zuletzt auf der 71. Sitzung im Juli 2017 mit dem Ziel eine IMO-Strategie zu erarbeiten (IMO 2017).

316. Die nationalstaatliche Zuordnung ist zwar für Minderungsziele und nationalstaatliche Verpflichtungen im Übergang zu einer dekarbonisierten Seeschifffahrt

ein wichtiger Maßstab, auch ist sie für den Einsatz marktbasierter Instrumente wie den Emissionsrechtehandel erforderlich. Aufgrund der Schwierigkeiten, eine von allen Flaggenstaaten akzeptierte Zuweisung der Emissionen aus der Seeschifffahrt zu entwickeln, sollte diese Diskussion jedoch nicht im Mittelpunkt stehen. Zudem ist aus Klimaschutzgründen auch in der Seeschifffahrt eine vollständige Dekarbonisierung bis 2050 erforderlich, sodass der Fokus auf politische Instrumente zur Minderung der Emissionen gelegt werden sollte.

5.12.2 Monitoring der Treibhausgasemissionen in der EU

317. Im 2. Erwägungsgrund der Verordnung (EU) Nr. 2015/757 über die Überwachung von Kohlendioxidemissionen aus dem Seeverkehr wird festgestellt, dass die CO_2-Emissionen aus der internationalen Seeschifffahrt in der EU zwischen 1990 und 2007 um 48 % gestiegen sind. Die Verordnung regelt die Erfassung der Treibhausgasemissionen und trat im Juli 2015 in Kraft. Sie verpflichtet alle Schiffe, die ab dem 1. Januar 2018 Häfen in der EU anlaufen, bis zum 31. August 2017 ein Monitoringkonzept für ihre Treibhausgasemissionen zu erstellen (engl. Monitoring, Reporting and Verification – MRV). Ab 2018 werden für Schiffe ab einer Größe von einer Bruttoraumzahl (BRZ) von 5.000 für jede Reise, bei der ein Hafen in EU-Mitgliedstaaten angelaufen wird, detaillierte Daten zu Abgangs- und Anlaufhafen, Fracht und der Emissionsfaktor aller Kraftstoffe erfasst, aus denen sich die absoluten Emissionen ermitteln lassen. Ab 2019 sind die Schifffahrtsunternehmen verpflichtet, sowohl der Europäischen Kommission als auch ihren Flaggenstaaten Emissionsberichte vorzulegen. Diese Berichte werden in der EU von akkreditierten Stellen überprüft. Allein die Einführung des MRV-Systems soll zu Emissionsreduktionen von 2 % führen.

Mit der Verabschiedung des MRV-Systems erzeugte die EU erheblichen Handlungsdruck für eine globale Einigung zur Überwachung der schiffsbezogenen Treibhausgasemissionen. Die ermittelten Daten bieten die Grundlage für den Einsatz verschiedener CO_2-basierter Instrumente. Erforderlich ist jedoch, die Methodik der Datenerhebung auf hohem Niveau möglichst frühzeitig mit der IMO abzugleichen, um die dauerhafte Existenz zweier paralleler Berichtssysteme dauerhaft zu vermeiden.

5.12.3 Verpflichtende globale Standards

318. Das größte Potenzial, in der Seeschifffahrt grundlegende Veränderungen hinsichtlich Antriebstechnologien, Effizienz und somit Minderung von Treibhausgasemissionen zu erzielen, liegt in einer gemeinsamen Strategie der Mitgliedstaaten der IMO, weil nur diese flächendeckend die gesamte Seeverkehrsflotte adressiert. Dem Vorteil einer globalen Gültigkeit der Vereinbarungen steht entgegen, dass die Verhandlungsprozesse langwierig sind. Da alle Mitgliedstaaten eine Einigung erzielen müssen, sind die Ergebnisse der IMO-Verhandlungen oft wenig ambitioniert. Zudem stand der Klimaschutz bislang nicht im Fokus der IMO und erhält erst seit den Pariser Klimaverhandlungen mehr Bedeutung.

Vielmehr lag das Hauptaugenmerk der IMO bislang auf der Minderung der Schadstoffbelastung von Luft und Wasser (RAHIM et al. 2016, S. 160; BOWS-LARKIN et al. 2014, S. 7). So ist ab 2020 für Schiffskraftstoffe ein Schwefelgrenzwert von 0,5 % einzuhalten, dies ist eine deutliche Verringerung gegenüber dem bislang geltenden Grenzwert von 3,5 % („IMO sets 2020 date for ships to comply with low sulphur fuel oil requirement“, Pressemitteilung der IMO vom 28.10.2016). Darüber hinaus gilt für die Überwachungsgebiete für Schwefelemissionen (Sulphur Emission Control Areas – SECA) in Nord- und Ostsee sowie dem Ärmelkanal seit dem 1. Januar 2015 ein verschärfter Grenzwert von 0,1 % Schwefelgehalt für den in diesen Zonen eingesetzten Schiffskraftstoff. 2021 werden in Nord- und Ostsee Überwachungsgebiete für Stickstoffemissionen (Nitrous Oxide Emission Control Area – NECA) eingerichtet. Da in den Emissionsüberwachungsgebieten Schweröl nur beim Einsatz von Abgasreinigungssystemen (Scrubber) eingesetzt werden darf, wird vorwiegend Schiffsdiesel genutzt, sodass auch die Treibhausgasemissionen sinken. Zwar kritisieren BOWS-LARKIN et al. (2014, S. 7), dass die Möglichkeit vergeben wurde, im Rahmen der Regulierung von Emissionsüberwachungsgebieten auch dem Klimaschutz mehr Gewicht zu verschaffen. Allerdings ist festzuhalten, dass das Ziel der Emissionsüberwachungsgebiete eine Verminderung der Schadstoffbelastung der Meere und der Luft ist und nicht auf Klimaschutzerwägungen zurückgeht.

319. Der Klimaschutz wird von der IMO vor allem über die verpflichtende Erstellung eines Management-Plans zur Steigerung der Energieeffizienz (Ship Energy Efficiency Management Plan – SEEMP) adressiert. Die Erstellung

Vorabfassung - wird durch die endgültige Fassung ersetzt.

dieses Plans ist für alle Seeschiffe bindend. Ziel der Pläne ist in erster Linie ein Monitoring des Energieverbrauchs, sodass durch Analyse veränderter Parameter und operative Maßnahmen die Energieeffizienz gesteigert, mithin der Gesamtenergieverbrauch und damit auch die Treibhausgasemissionen vermindert werden können. Im Oktober 2016 wurde von der IMO eine ergänzende Berichtspflicht über die Energieverbräuche eines jeden Schiffs an die IMO und den jeweiligen Flaggenstaat beschlossen, die in ihrer Zielsetzung der Verordnung (EU) Nr. 2015/757 ähnelt, aber im Umfang und den Anforderungen hinsichtlich Verifizierung und Veröffentlichung der Daten deutlich weniger ambitioniert ist. Wenngleich der Einsatz von SEEMP zur Setzung von Benchmarks führen kann und die Berichtspflicht ein erster Schritt zur detaillierten Erfassung der Treibhausgasemissionen ist, so fehlt doch ein Emissionsreduktionsziel für die Seeschifffahrt als Orientierungs- und Zielmarke (SHI 2016, S. 124 f.). Notwendig sind neben der Vereinbarung eines Gesamtreduktionsziels jedoch auch Zwischenziele für den Pfad zu einem treibhausgasneutralen Seeschiffsverkehr.

Über die Erstellung von SEEMP und die künftige Berichtspflicht hinaus gilt seit dem 1. Januar 2013 zusätzlich der Energy Efficiency Design Index (EEDI). Der EEDI legt die maximalen spezifischen CO_2-Emissionen pro Tonne Ladung und Seemeile für unterschiedliche Schiffstypen fest. Gemäß EEDI müssen neu gebaute Schiffe aus den Baujahren 2015 bis 2019 um 10 %, aus den Jahren 2020 bis 2024 um 20 % und in einer dritten Stufe ab 2025 um 30 % effizienter sein als die Referenzgröße, die auf Schiffen der Baujahre 1999 bis 2008 basiert und durch den Estimated Index Value (EIV) ermittelt wurde. Die Berechnungsformel des EIV ist gegenüber der EEDI-Formel ein vereinfachtes Berechnungsverfahren. Aufgrund der unterschiedlichen Methodik ist der ermittelte Effizienzwert des EEDI generell besser als der des EIV (FABER et al. 2014, S. 5 f.).

Mit seiner Ausrichtung auf Neubauten betrifft der EEDI allerdings nur einen kleinen Teil der Welthandelsflotte, sodass die Durchdringung der Flotte mit höheren Effizienzstandards bei einer Nutzungsdauer von dreißig und mehr Jahren erst langfristig erfolgt. Die Regelungen des EEDI lassen den Auftraggebern und Eignern freie Hand, ob der Mindesteffizienzstandard etwa durch eine veränderte Antriebstechnik, andere Rumpfschnitte oder eine verminderte Reisegeschwindigkeit erreicht werden (SHI 2016, S. 124). Eine Studie zur Evaluierung der Wirksamkeit des EEDI hat die Effizienz von Neubauten ab dem Jahr 2009 mithilfe des EIV ermittelt und daraus den EEDI abgeschätzt. Sie kommt zu dem Schluss, dass die Effizienz neu gebauter Seeschiffe beständig stieg und zunehmend ein Teil der Neubauten bessere Effizienzwerte erreicht als gefordert (FABER et al. 2014).

320. Mit Blick auf die prognostizierten Steigerungsraten für den Seegüterverkehr kann davon ausgegangen werden, dass selbst eine vollständige Implementierung des Instrumentensets aus Managementplänen, Berichtspflichten und Anforderungen an Neubauten nicht zu einer absoluten Minderung der Treibhausgasemissionen des Seeschiffsverkehrs führen, sondern lediglich zu einer Dämpfung der Emissionssteigerungen beitragen werden. Insgesamt werden SEEMP und EEDI als nicht ambitioniert genug angesehen, um den notwendigen Klimaschutzbeitrag der Seeschifffahrt zu generieren (u. a. MANDER 2017; RAHIM et al. 2016, S. 212; SHI 2016, S. 125; BOWSLARKIN et al. 2014). Neben verbindlichen ambitionierten Klimaschutzzielen für die Seeschifffahrt im Einklang mit den Paris-Zielen ist eine Absenkung des Endenergieverbrauchs durch technologische und operative Maßnahmen sowie den Einsatz treibhausgasneutraler Kraftstoffe im Seeverkehr erforderlich. Notwendig erscheint in jedem Fall eine Zunahme an verpflichtenden Standards, da aufgrund der bestehenden Überkapazitäten (Tz. 314) rein marktgetriebene Veränderungen in den nächsten Jahren nicht erwartet werden können. Die Langlebigkeit von Schiffen und Antrieben erfordert daher ein zeitnahes politisches Handeln mit dem Ziel, die Dekarbonisierung der Seeschifffahrt voranzubringen und bis 2050 abzuschließen.

5.12.4 Freiwillige internationale Initiativen

321. Neben den IMO-Regeln zum Energieverbrauch neu aufgelegter Schiffe bestehen auch freiwillige Initiativen von Häfen, die Hafengebühren stärker an den Umweltbeeinträchtigungen der Schiffe auszurichten. Dabei ist der von der World Ports Climate Initiative (WPCI) entwickelte ESI das Instrument mit der bislang größten Verbreitung (COGEA 2017). In der WPCI haben sich (bisher) knapp 50 Häfen zusammengeschlossen (WPCI o. J.), die den ESI als Grundlage eines Bonussystems zur Berechnung der Hafengebühren einsetzen. Der ESI berücksichtigt über eine Formel die schiffsgebundenen Emissionen von NO_x, SO_x und Treibhausgasemissionen sowie die Möglichkeit, anstelle der auf Schiffsdiesel basierenden, bordeigenen Stromversorgung bei Liegezeiten auf landgebundene Stromversorgung zurückzu-

Vorabfassung - wird durch die endgültige Fassung ersetzt.

greifen. Allerdings liegt der Fokus auf Beeinträchtigungen der Luftqualität in den Häfen, sodass die Gewichtung des ESI einen deutlichen Schwerpunkt auf NO_x (bis zu 2 x 100 Punkte) und SO_x (bis zu 100 Punkte) legt, während die CO_2-Effizienz nur mit einem geringen Anteil (maximal 10 Punkte) zum Tragen kommt.

Die Bewertung eines Schiffes auf Basis des ESI ist ein freiwilliges Instrument. Derzeit sind 6.868 Schiffe nach ESI bewertet. Zu den Häfen, die der WPCI beigetreten sind, zählen auch die für den europäischen Seegüterverkehr bedeutsamsten Häfen der Nordrange, also die großen Seehäfen zwischen Le Havre und Hamburg (Stand 10.07.2017).

5.12.5 Empfehlungen für die Seeschifffahrt

Verschärfung internationaler Standards

322. Europa nimmt bereits heute hinsichtlich der Umweltverträglichkeit und des Klimaschutzes des Seeverkehrs eine Vorreiterposition ein. So zeigt die Regulierung der Emissionsüberwachungsgebiete (ECA), aber auch das MRV-Konzept, dass europäische Initiativen für ambitionierte Standards zur Weiterentwicklung des Regelungsrahmens der IMO führen. Werden die Emissionsgrenzwerte in ECA sukzessive verschärft, hätte dies auch einen positiven Effekt für den Klimaschutz. Es könnten umweltfreundlichere Kraftstoffe zum Einsatz kommen, mit denen auch geringere Treibhausgasemissionen einhergingen. Zudem könnten die Anforderungen an Scrubber steigen, sodass diese immer kostenintensiver werden, während – wie große Hersteller von Schiffsmotoren wie MAN und Rolls-Royce erwarten – die Nutzung von LNG (liquefied natural gas) mit zunehmender Marktdurchdringung günstiger wird. Durch diese beiden Entwicklungen würde der Anreiz zur Umrüstung der Schiffsantriebe steigen. Deutschland könnte in der IMO eine Diskussion darüber anregen, die Vorschriften für Schiffskraftstoffe zunehmend generell und nicht ausschließlich innerhalb der ECA anzuwenden. Generell sollte Deutschland sich innerhalb der IMO für ambitionierte Standards aussprechen, die auch den Klimaschutz adressieren, und sich für ein Emissionsminderungsziel für die Seeschifffahrt im Einklang mit den Zielen des Klimaabkommens von Paris einsetzen, das letztlich in einer vollständigen Dekarbonisierung mündet.

Veränderung der Abgaben auf Schiffskraftstoffe und Landstrom

323. Die Bundesregierung sollte sich jedoch nicht ausschließlich in der IMO für strenge Emissionsstandards einsetzen, da hier aufgrund der vielen Beteiligten die Verfahren langwierig und die Ergebnisse oft wenig ambitioniert sind. Es sollte vielmehr verstärkt über Instrumente nachgedacht werden, die europaweit gültig sind und Anreize setzen, die Seeschifffahrtsflotte insgesamt umweltfreundlicher zu gestalten. Ein erster wirksamer Schritt liegt in der Aufhebung der Steuerbefreiung für Schiffskraftstoffe in Deutschland. In einem zweiten Schritt sollte eine europaweite CO_2-Bepreisung erfolgen. Steigende Preise für konventionelle Kraftstoffe bieten einen Anreiz, in alternative Antriebstechnologien zu investieren. Die Gefahr einer Verlagerung von Treibhausgasemissionen besteht bei EU-weiten Regulierungen und Standards und damit auch einer EU-weiten treibhausgasbezogenen Bepreisung von Schiffskraftstoffen insoweit nicht, als dass ein Großteil der Warenströme aus Übersee über die europäischen Häfen abgewickelt werden muss, mithin auch das notwendige Bunkern von Kraftstoffen in Europa geschieht. Aufgrund des Aufwands wie Revierfahrten, Lotsen- und Schlepperbegleitung, Hafengebühren und ähnlichem scheint es unwahrscheinlich, dass große Handelsschiffe ausschließlich zum Bunkern Häfen außerhalb Europas anfahren. Allerdings sind die Konsequenzen des EU-Austritts Großbritanniens bislang nicht absehbar, so fahren viele Schiffe im Linienverkehr neben Häfen auf dem Kontinent auch solche in Großbritannien an. Bei einer klimaschutzmotivierten Bepreisung von Schiffskraftstoffen ist die oben dargestellte schwierige Zuordnung der Emissionen zu Nationalstaaten und damit Anrechnung auf deren Ziele und Budgets nicht erforderlich. Alternativ könnte die Schifffahrt auch in den europäischen Emissionshandel einbezogen werden.

Ergänzend sollte die landseitige Stromversorgung gefördert werden, um die Emissionen von Treibhausgasen und Luftschadstoffen während der Liegezeiten zu verringern. Diese Maßnahme würde lokal in jedem Fall zu einer verminderten Schadstoffbelastung der Luft führen und hätte bei einer zunehmenden Stromerzeugung durch erneuerbare Energien auch globale Emissionsminderungseffekte. Ein möglicher Ansatz könnte in Deutschland die Befreiung der Landstromversorgung von Schiffen von der EEG-Umlage sein.

Vorabfassung - wird durch die endgültige Fassung ersetzt.

Weiterentwicklung des Environmental Ship Indexes

324. Der ESI sollte als wichtiger Ansatzpunkt genutzt werden, um außerhalb der IMO zu einer Reduktion der Emissionen aus der Seeschifffahrt zu kommen. Hierbei sollten drei Wege parallel beschritten werden:

- Verpflichtende Einstufung von Schiffen, die Häfen in der EU anlaufen, nach dem ESI (bisher freiwillig). Dabei sollte eine Verzahnung mit der Verordnung (EU) Nr. 2015/757 geprüft werden.
- Weiterentwicklung des ESI mit einer Stärkung der Klimakomponente (bisher schwach ausgeprägt).
- Übergang von einem Bonussystem mit reduzierten Hafengebühren für saubere Schiffe hin zu einem Malussystem mit Aufschlägen für Schiffe mit hohen Emissionswerten.

Mitglieder der WPCI, die den ESI entwickelt hat, sind die Häfen, so die deutschen Seehäfen Hamburg, Bremerhaven/Bremen, Wilhelmshaven Kiel, Brunsbüttel und Rostock. Alle haben in ihren Gebührenordnungen Boni auf Basis des ESI verankert. Die deutschen Seehäfen werden von eigens gegründeten Institutionen verwaltet, die zu 100 % dem jeweiligen Bundesland gehören. Deutschland hat daher die Möglichkeit, über die Hafengesellschaften und die Bundesländer als deren Eigentümer auf die weitere Gestaltung des ESI Einfluss zu nehmen.

Während die Einstufung nach dem ESI als verpflichtender Standard für das Anlaufen von Häfen in der EU durch die Bundesregierung forciert werden kann, obliegt die Weiterentwicklung des ESI ebenso wie die Veränderung zu einem Malussystem den Häfen. Durch die systematische Veränderung des ESI zu einem Malussystem würde der der normalen Hafengebühr zugrunde liegende Emissionsstandard stetig angehoben. Zudem würde ein Aufschlag auf die Gebühren als Wettbewerbsnachteil wahrgenommen und könnte dazu beitragen, dass die Handelsflotte insgesamt emissionsärmer wird.

Dabei ist erforderlich, dass die Häfen der Nordrange gemeinsam vorgehen, um eine Standortkonkurrenz durch geringere Standards zu verhindern. Die Bundesregierung sollte sich daher auf europäischer Ebene sowie im Rahmen der Zusammenarbeit mit den Ländern für eine Stärkung und Weiterentwicklung des ESI einsetzen.

Absicherung der Bunkerinfrastruktur

325. Ein verstärkter Einsatz von LNG, das zunächst auf fossilem, in Zukunft aber regenerativ erzeugtem Gas basiert, ist zwar bereits technisch möglich, trifft aber auf unterschiedliche Hindernisse. So ist die Infrastruktur nicht in allen Häfen verfügbar. Ein erster Schritt, um die Bunkerung alternativer Kraftstoffe sicherzustellen, liegt in einheitlichen Bunkerregeln in den deutschen Häfen. Die Bundesregierung sollte sich deshalb mit den Bundesländern auf eine einheitliche Regelung für LNG-Bunkerung verständigen, die keine zusätzlichen Kosten für die Schiffe bzw. Reedereien verursacht. Darüber hinaus sollte die Bundesregierung den Aufbau der notwendigen Infrastrukturen unterstützen. Nur wenn die Bunkerung von LNG auf den wichtigsten Reiserouten gesichert ist, werden zunehmend konventionelle Antriebe ersetzt werden. Die Bundesregierung sollte daher prüfen, inwieweit gemeinsam mit Staaten aus den wichtigsten Fahrtgebieten wie Nordamerika und Asien Initiativen entwickelt werden können.

5.13 Instrumente für einen klimaneutralen Luftverkehr

326. Die klimaneutrale Ausgestaltung des Luftverkehrs erfordert Maßnahmen auf nationaler, europäischer und internationaler Ebene, die zudem nach ihrer zeitlichen Wirksamkeit unterschieden werden können. Zusätzlich sind auch die über einhundert bilateralen Luftverkehrsabkommen relevant, in denen wesentliche Aspekte geregelt sind, wie zum Beispiel die Festlegung auf Kerosinsteuerbefreiungen.

Nationale Ebene

327. Auf der nationalen Ebene ist es erforderlich, die Subventionierung des Luftverkehrs abzubauen. Die politische Absicht, den Luftverkehr finanziell zu entlasten, lässt dagegen Klima-, Umwelt- und Gesundheitsaspekte außer Acht. Laut UBA flossen im Jahr 2012 rund 12 % (7 Mrd. Euro; UBA 2016g, S. 44) aller umweltschädlichen Subventionen in die Steuerbefreiung des Kerosins (zum Vergleich Dieselsubventionen: 7,3 Mrd. Euro; ebd., S. 41). Kerosin ist durch § 27 Abs. 2 Energiesteuergesetz (EnergieStG) für den gewerblichen Luftverkehr von der Energiesteuer befreit. Zudem betrug die Subventionierung des innereuropäischen Luftverkehrs durch dessen Mehrwertsteuerbefreiung im Jahr 2012 in Deutschland 4,7 Mrd. Euro (ebd., S. 45).

Vorabfassung - wird durch die endgültige Fassung ersetzt.

Die Subventionierung von Kerosin durch die Steuerbefreiung sollte aus Sicht des SRU entfallen. Auf nationaler Ebene besteht hierfür jedenfalls die Möglichkeit zur kurzfristigen Umsetzung. Eine Besteuerung ist auch in der Energiesteuerrichtlinie 2003/96/EG für kommerzielle Inlandsflüge vorgesehen (von dieser Möglichkeit haben allerdings nur die Niederlande Gebrauch gemacht). Problematisch könnte allerdings sein, dass damit ein Anreiz geschaffen wird, Flugkraftstoff über den Bedarf für den einzelnen Flug hinaus mitzunehmen (sog. tankering), um die höheren Steuern zu vermeiden. Die Folgen könnten höhere Treibhausgasemissionen bei den genannten Flügen sein. Ein koordiniertes Vorgehen einer größeren Gruppe von Staaten wäre deshalb vorzugswürdig. Der Ausschluss der Kerosinbesteuerung in bestehenden bilateralen Luftverkehrsabkommen sollte revidiert werden. Überdies sollte juristisch geprüft werden, ob die Besteuerung von Kerosin tatsächlich durch Art. 24 lit. a des Abkommens über die internationale Zivilluftfahrt (Chicagoer Abkommen) unmöglich gemacht wird, wie vielfach angenommen wird. Das Abkommen regelt, dass Kraft- und Schmierstoffe, die sich bei Ankunft im Hoheitsgebiet eines anderen Vertragsstaates an Bord eines Luftfahrzeuges befinden und beim Verlassen des Hoheitsgebietes an Bord verbleiben, von Zöllen, Revisionsgebühren oder ähnlichen staatlichen oder örtlichen Abgaben und Gebühren befreit sind (vgl. zu dieser Frage PACHE 2005).

Sinnvoll wäre es zudem, die Luftverkehrsteuer weiterzuentwickeln und sie nach Klimawirkung differenziert auszugestalten. Langfristig sollten die Steuertarife steigen und die politische Deckelung der Einnahmen auf 1 Mrd. Euro pro Jahr aus Luftverkehrsteuer und EU-Emissionshandel abgeschafft werden.

Ein weiterer Ansatzpunkt auf nationaler Ebene ist die Einbeziehung von Umweltkosten in die Höhe der Start- und Landegebühren, wie dies bereits in Schweden und der Schweiz geschieht. Dadurch kann ein Anreiz geschaffen werden, emissionsärmere Flugzeuge zu erwerben. An erster Stelle stehen hier emissionsdifferenzierten Landeentgelte, die kurzfristig umgesetzt werden könnten, weil sie einen nationalen Charakter besitzen. Für Langstreckenflüge müsste dagegen aufgrund wettbewerbsrechtlicher Probleme zuvor eine internationale Vereinbarung geschlossen werden (ZUKUNFT 2002).

Der Luftverkehr wird auch durch die Subventionierung von strukturell unwirtschaftlichen Flughäfen gefördert (SRU 2014, Tz. 175). Eine bundesweite Flughafenplanung sollte dazu beitragen, dass nur noch in wirtschaftlich tragfähige Flughäfen investiert wird.

Dienstreisen mit dem Flugzeug verursachen erhebliche CO_2-Emissionen. Die Erstattung von Flugreisekosten nach Bundesreisekostengesetz (BRKG) für Bundesbehörden ist nicht auf Langstrecken begrenzt (§ 4 BRKG). Das Bundesreisekostengesetz regelt nur, dass Flugkosten erstattet werden, wenn das Flugzeug aus dienstlichen oder wirtschaftlichen Gründen benutzt wird. Allerdings ist bei der Wirtschaftlichkeit neben den Kosten der Reise auch ein möglicher Arbeitszeitgewinn zu berücksichtigen. Geschäftliche Flugreisen im Inland sind auch steuerlich absetzbar. Aus Sicht des SRU sollten Dienstreisen des Bundes prioritär mit der Bahn durchgeführt werden.

EU-Ebene

328. Beim EU-Emissionshandel sollten die Reduktionsziele für den Luftverkehr verschärft und den Zielen der anderen Sektoren angeglichen werden. Darüber hinaus sollte mittelfristig die vollständige Klimawirksamkeit des Luftverkehrs berücksichtigt werden (Tz. 92 ff.).

Auf europäischer Ebene sollte außerdem die Mehrwertsteuerrichtlinie 2006/112/EG geändert werden, um grenzüberschreitende gewerbliche Flüge mehrwertsteuerpflichtig zu machen. Die derzeitige Steuerbefreiung führt zu Wettbewerbsverzerrungen gegenüber dem grenzüberschreitenden Bus- und Schienenverkehr, was angesichts der Klimaschädlichkeit des Luftverkehrs nicht zu rechtfertigen ist (UBA 2016g).

Internationale Ebene

329. International sollte kurzfristig das marktbasierte Instrument zur Reduktion der Treibhausgaswirkungen des Luftverkehrs CORSIA (Carbon Offsetting Scheme for International Aviation) sinnvoll ausgestaltet werden, insbesondere sollte es auch bei einem Einsatz von Biokraftstoffen oder stromgenerierten Kraftstoffen zusätzliche Offset-Verpflichtungen für deren (Nicht-CO_2-)Klimawirkung vorsehen (BDL 2017). Wünschenswert wäre es, die in den kommenden Jahren beginnende Ausgestaltung von marktbasierten Instrumenten der internationalen Klimapolitik unter der Klimarahmenkonvention der Vereinten Nationen und der ICAO aufeinander abzustimmen, um eine Unterminierung der Umweltintegrität durch Doppelzählungen von Emissionsminderungen zu vermeiden (ARVANITAKIS und DRANSFELD 2017).

Vorabfassung - wird durch die endgültige Fassung ersetzt.

330. Langfristig kann nur ein Teil der Klimawirkungen des Luftverkehrs im Sektor selbst – vor allem durch eine Umstellung der Energieversorgung – adressiert werden. Die Nicht-CO_2-Effekte sollten daher weiterhin kompensiert werden. Da absehbar keine direkte Elektrifizierung des Luftverkehrs erfolgen wird, muss dieser langfristig auf der Basis von Bio-/PtL-Kerosin erfolgen. Zwar haben Airbus und Siemens 2016 eine Kooperation gestartet, um ein E-Flugzeug zu entwickeln. Bei den bislang realisierten Flugzeugen handelt es sich aber lediglich um Kleinstflugzeuge mit einer begrenzten Reichweite. Die Markteinführung von Bio-/PtL-Kerosin könnte durch die Einführung einer entsprechenden Quote angereizt werden. Angesichts der prognostizierten Wachstumsraten des Luftverkehrs erscheint es fraglich, ob eine nachhaltige Produktion von Bio-/PtL-Kerosin möglich ist, die dem Naturschutz und internationalen Gerechtigkeitsaspekten Rechnung trägt. Werden die externen Kosten hingegen angemessen einbezogen, ist davon auszugehen, dass die Preise des Fliegens deutlich steigen werden, was wiederum zu einer Verlangsamung des Wachstums beitragen kann.

5.14 Beschleunigter Ausbau der erneuerbaren Energien

331. Die Dekarbonisierung des Verkehrs und anderer Sektoren bedeutet die Abkehr von der Verbrennung fossiler Energieträger und somit eine Umstellung der Energiebasis. Dabei wird erneuerbarer Strom zukünftig das Rückgrat der Energieversorgung darstellen. Zwar wird neben der Nutzung erneuerbarer Wärme auch Bioenergie einen gewissen Beitrag leisten, angesichts der begrenzten Verfügbarkeit nachhaltig erzeugter Biomasse wird dieser jedoch vergleichsweise klein bleiben.

332. Die weitgehende direkte und indirekte Elektrifizierung der verschiedenen Verbrauchssektoren (Verkehr, Wärmeversorgung, Industrie) wird auch bei einer ambitionierten Effizienzpolitik in allen Sektoren mit einem deutlichen Anstieg der Stromnachfrage einhergehen. Damit der sich aus einer beschleunigten Sektorkopplung ergebende zusätzliche Strombedarf auch tatsächlich treibhausgasarm gedeckt wird, ist der Ausbau der erneuerbaren Stromerzeugungskapazitäten deutlich zu beschleunigen. Die mit dem EEG 2017 angestrebten Zubauraten, deren tatsächliche Realisierung überdies fraglich ist, sind für eine zügige Umstellung der Energiebasis auf erneuerbaren Strom nicht ausreichend. Der zukünftige Zubaukorridor sollte sich dabei proaktiv an Stromverbrauchsprognosen orientieren, welchen ambitionierte Klimaziele und die daraus resultierende Elektrifizierung der Verbrauchssektoren zugrunde liegen. Eine rein reaktive Anpassung des Zubaus würde zu deutlich höheren kumulierten Emissionen führen, da Zuwächse bei der Stromnachfrage zunächst für einige Jahre aus fossilen Kraftwerken bedient werden müssten. Zudem sollte der Zubaukorridor eine Sicherheitsreserve enthalten, damit auch eine schneller als prognostiziert sattfindende Sektorkopplung treibhausgasarm realisiert werden kann.

333. Neben einer Anpassung der im EEG geregelten kurz- und mittelfristigen Zubauraten sind auch die langfristigen 2050-Ziele für den Anteil der erneuerbaren Energien an der Energieversorgung insgesamt (60 %) und am Strommix (80 %) deutlich zu niedrig, um einen angemessen Beitrag Deutschlands zu den Zielen des Klimaabkommens von Paris zu leisten. Sie sind deshalb entsprechend anzuheben (QUASCHNING 2016). Letztlich muss die Energieversorgung spätestens bis zur Mitte des Jahrhunderts nahezu vollständig auf erneuerbaren Energien beruhen.

334. Es ist wahrscheinlich, dass Deutschland seinen zukünftigen Energiebedarf nicht vollständig aus heimischen Quellen wird decken können. Der Bedarf an synthetischen Kohlenwasserstoffen wird voraussichtlich zumindest partiell aus dem Ausland gedeckt werden müssen. Die Produktion synthetischer Kohlenwasserstoffe wird gerade auch an Gunststandorten im Ausland stattfinden, an denen erneuerbarer Strom günstig und mit geringer Volatilität verfügbar ist. Die Bundesregierung sollte frühzeitig an Strategien zur Erschließung von Standorten arbeiten, die die Interessen der Produktionsländer umfassend berücksichtigen. Hierbei wird Deutschland voraussichtlich in Konkurrenz mit anderen Ländern treten, deren Dekarbonisierungsstrategien auch an Restriktionen hinsichtlich der heimischen Verfügbarkeit erneuerbarer Energien stoßen. Dies verdeutlicht erneut die Notwendigkeit, den Energiebedarf des Verkehrssektors soweit wie möglich zu reduzieren. Auch wenn die großskalige Produktion synthetischer Kohlenwasserstoffe voraussichtlich vor allem außerhalb Deutschlands stattfinden wird, sollte sie auf nationaler Ebene industrie- und forschungspolitisch gefördert werden, da es sich hierbei um eine für die Dekarbonisierung wichtige und ökonomisch aussichtsreiche Zukunftstechnologie handelt.

Vorabfassung - wird durch die endgültige Fassung ersetzt.

Vorabfassung - wird durch die endgültige Fassung ersetzt.

6 Ausblick

335. Der Verkehrssektor steht vor großen Veränderungen. Ein wichtiger Beweggrund dafür ist der Klimaschutz. Für den SRU steht außer Frage, dass Deutschland einen angemessenen Beitrag dazu leisten muss, auf der Erde langfristig stabile klimatische Bedingungen zu erhalten. Dafür ist vor allem eine Abkehr von fossilen Brennstoffen nötig – auch im Verkehrssektor. Diese klimapolitische Herausforderung ist gleichzeitig die Chance, den durch unsere vom Auto geprägte Mobilität verursachten ökologischen und gesundheitlichen Problemen aktiv zu begegnen. In seinem ersten Sondergutachten „Auto und Umwelt" aus dem Jahre 1973 schrieb der SRU: „Gleichzeitig ist die Motorisierung jedoch eine wesentliche Ursache für erhebliche Beeinträchtigungen der Umwelt als menschlichem Lebensraum, der vom Individualverkehr in dreifacher Weise tangiert wird: Das Automobil verursacht Emissionen verschiedenster Art (Abgase, Lärm, Abfälle), es nimmt den knapper werdenden Ressourcenvorrat (Energie, Boden) in immer stärkerem Maße in Anspruch und es ruft schließlich soziale und politische Planungsprobleme hervor, die sich im Bereich der Stadtentwicklungsplanung am deutlichsten zeigen" (SRU 1973). Seit dieser Analyse hat sich die Verkehrsdichte – gemessen als Anzahl von Kraftfahrzeugen pro Kopf – mehr als verdoppelt. Eine Umgestaltung des Mobilitätssystems bietet die Chance, die von unserer Gesellschaft lange hingenommenen, aber zunehmend kontrovers diskutierten negativen Effekte des Verkehrs stark zu mindern und gleichzeitig intelligente neue Mobilitätsformen zu etablieren.

Das vorliegende Gutachten analysiert den Stand des Wissens zu technisch und ökonomisch sinnvollen Pfaden für ein klimaneutrales und ressourceneffizientes Verkehrssystem. Es berücksichtigt dabei wichtige Schnittstellen zu ökonomischen, technischen und sozialen Entwicklungen – beispielsweise die Digitalisierung und den gesellschaftlichen Wertewandel. Die Art, in der Menschen und Güter fortbewegt werden, ist in vielfältiger Weise mit Lebensqualität, wirtschaftlichem Wohlstand, Umwelt, Gesundheit und sozialer Gerechtigkeit verknüpft. Veränderungen des Verkehrssystems betreffen alle Menschen in alltäglichen Entscheidungen und Abläufen. Sie werden auch große qualitative und quantitative Arbeitsplatzeffekte haben, beispielsweise in der Automobilindustrie und im Transportgewerbe.

Der SRU hält daher eine breite gesellschaftliche Debatte über die Zukunft der Mobilität für überfällig, zu der dieses Gutachten beitragen soll. Die Verkehrswende wird nur gelingen, wenn sie umwelt-, klima- und gesundheitspolitische Anforderungen mit wirtschaftlichen Chancen und gesellschaftlich attraktiven Mobilitätsangeboten verbinden kann. Sie wird außerdem viele Jahre in Anspruch nehmen. Veränderungen des Modal Split im Nah- wie im Fernverkehr erfordern Investitionen in die Infrastruktur, die über lange Zeiträume geplant und umgesetzt werden müssen. Notwendig ist auch eine Abstimmung der verschiedenen politischen Ebenen – von der EU über den Bund, die Länder und die Kommunen. Dabei müssen die dynamischen internationalen Entwicklungen im Blick gehalten werden. Es ist daher strategische Weitsicht der Politik erforderlich, um die sich abzeichnenden technischen, ökonomischen und gesellschaftlichen Veränderungen zukunftsfähig zu gestalten. Gleichzeitig sollte angesichts der knappen Zeit, um die Klimaziele zu erreichen, und der begrenzten Ressourcen nicht weiter gezögert werden. Entscheidungen müssen in dieser Legislaturperiode getroffen werden.

Vorabfassung - wird durch die endgültige Fassung ersetzt.

Literaturverzeichnis

50Hertz Transmission (Hrsg.) (2012): Freileitung oder Erdkabel. Hintergrundinformationen. Berlin: 50Hertz Transmission.

50Hertz Transmission, Amprion, TenneT TSO, TransnetBW (2017): Netzentwicklungsplan Strom 2030. Offshore-Netzentwicklungsplan 2030. Version 2017. 2. Entwurf. Berlin, Dortmund, Bayreuth, Stuttgart: 50Hertz Transmission, Amprion, TenneT TSO, TransnetBW. Zahlen. Daten. Fakten. https://www.netzentwicklungsplan.de/sites/default/files/paragraphs-files/NEP_2030_2_Entwurf_Zahlen-Daten-Fakten_online.pdf (21.07.2017).

Aarnink, S., Faber, J., Boer, E. den (2012): Market Barriers to Increased Efficiency in the European On-road Freight Sector. Delft: CE Delft. http://www.theicct.org/sites/default/files/publications/CE_Delft_4780_Market_Barriers_Increased_Efficiency_European_Onroad_Freight_Sector_def-2.pdf (14.09.2017).

AGEB (Arbeitsgemeinschaft Energiebilanzen) (2017): Energiedaten-Sammlung. Berlin: AGEB.

AGEB (2016): Auswertungstabellen zur Energiebilanz Deutschland 1990 bis 2015. Stand: 27.07.2016. Berlin: AGEB. http://www.ag-energiebilanzen.de/10-0-Auswertungstabellen.html (10.04.2017).

Agora Energiewende (2017a): Energiewende 2030: The Big Picture. Megatrends, Ziele, Strategien und eine 10-Punkte-Agenda für die zweite Phase der Energiewende. Berlin: Agora Energiewende. Impulse.

Agora Energiewende (2017b): Neue Preismodelle für Energie. Grundlagen einer Reform der Entgelte, Steuern, Abgaben und Umlagen auf Strom und fossile Energieträger. Berlin: Agora Energiewende. Hintergrund.

Agora Verkehrswende (2017): Mit der Verkehrswende die Mobilität von morgen sichern. 12 Thesen zur Verkehrswende. Berlin: Agora Verkehrswende.

Alexander-Kearns, M. P., Miranda, Cassady, A. (2016): The Impact of Vehicle Automation on Carbon Emissions – Where Uncertainty Lies. Washington, DC: Center for American Progress.

AlixPartners (2016): A Watershed Moment for the Automotive Industry. London: AlixPartners. https://emarketing.alixpartners.com/rs/emsimages/2016/pubs/EI/AP_A_Watershed_Moment_for_the_Automotive_Industry_Aug_2016.pdf (20.07.2017).

Allianz pro Schiene (2015): Stadt, Land, Schiene. 15 Beispiele erfolgreicher Bahnen im Nahverkehr. Berlin: Allianz pro Schiene.

Allianz pro Schiene, BDI (Bundesverband der Deutschen Industrie), Deutsche Bahn AG, DSLV (Deutscher Speditions- und Logistikverband), DVF (Deutsches Verkehrsforum), kombiverkehr, NEE, SGKV (Studiengesellschaft für den kombinierten Verkehr), Wirtschaftsvereinigung Stahl, VDB (Verband der Bahnindustrie in Deutschland), VDV (Verband Deutscher Verkehrsunternehmen), VPI (Verband der Güterwagenhalter in Deutschland) (2017): Masterplan Schienengüterverkehr. Berlin: Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur.

Allwood, J. M., Daehn, K., Serrenho, A. (2016): Automobiles and Sustainability: Bridging the gap between environmental security and commercial reality. Vortrag, 16th International Automobile Recycling Congress IARC 2016, 16.–18. März 2016, Berlin.

Anderson, J. E., Bergfeld, M., Hoffmann, N., Kuhnimhof, T., Lenz, B., Steck, F., Friedrich, H. E., Kleiner, F., Klötzke, M., Schmid, S., Chlond, B., Soylu, T., Weiß, C. (2016a): LADEN2020 Schlussbericht. Konzept zum Aufbau einer bedarfsgerechten Ladeinfrastruktur in Deutschland von heute bis 2020. Berlin, Karlsruhe: Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt – Institut für Verkehrsforschung, Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt – Institut für Fahrzeugkonzepte, Karlsruher Institut für Technologie – Institut für Verkehrswesen.

Anderson, J. M., Nidhi, K., Stanley, K. D., Sorensen, P., Samaras, C., Oluwatola, O. A. (2016b): Autonomous vehicle technology: A guide for policymakers. Santa Monica, Calif.: Rand Corporation.

Angerer, G., Buchholz, P., Gutzmer, J., Hagelüken, C., Herzig, P., Littke, R., K.Thauer, R., Wellmer, F.-W. (2016): Rohstoffe für die Energieversorgung der Zukunft. Geologie, Märkte, Umwelteinflüsse. München, Halle (Saale),

Vorabfassung - wird durch die endgültige Fassung ersetzt.

Mainz: acatech – Deutsche Akademie der Technikwissenschaften, Nationale Akademie der Wissenschaften Leopoldina, Union der deutschen Akademien der Wissenschaften. Energiesysteme der Zukunft.

Arnold, G., Brandl, R., Degner, T., Gerhardt, N., Landau, M., Nestle, D., Portula, M., Scheidler, A., Schwinn, R., Baumbusch, K., Dörschlag, A., Eberhardt, T., Wacker, V., Wesemann, A., Führer, O., Leifert, T., Bäuml., G., Bärwaldt, G., Haupt, H., Kammerlocher, M., Nannen, H. (2016): Intelligente Netzanbindung von Elektrofahrzeugen zur Erbringung von Systemdienstleistungen – INEES. Kassel, Hamburg, Niestetal, Wolfsburg: Fraunhofer IWES, LichtBlick SE, SMA Solar Technology AG, Volkswagen AG. https://lbsflibraries.blob.core.windows.net/sflibs/docs/default-source/schwarminnovationen/inees_abschlussbericht.pdf (14.09.2017).

Arvanitakis, A., Dransfeld, B. (2017): Design of an Offset System as Global MBM Scheme for international Aviation in the Light of the Paris Agreement. Berlin: German Emissions Trading Authority DEHSt. https://www.dehst.de/SharedDocs/downloads/EN/project-mechanisms/GMBM-abschlussbericht.pdf;jsessionid=EC6FCC0900BB31087BD6C245AAC465CB.1_cid292?__blob=publicationFile&v=3 (18.07.2017).

Augustin, J., Sauerborn, R., Burkart, K., Endlicher, W., Jochner, S., Koppe, C., Menzel, A., Mücke, H.-G., Herrmann, A. (2017): Gesundheit. In: Brasseur, G., Jacob, D., Schuck-Zöller, S. (Hrsg.): Klimawandel in Deutschland. Entwicklung, Folgen, Risiken und Perspektiven. Berlin, Heidelberg: Springer, S. 137–150.

Aulinger, A., Matthias, V., Zeretzke, M., Bieser, J., Quante, M., Backes, A. (2016): The impact of shipping emissions on air pollution in the greater North Sea region. Part 1: Current emissions and concentrations. Atmospheric Chemistry and Physics 16, S. 739–758.

Azar, C., Sandén, B. A. (2011): The elusive quest for technology-neutral policies. Environmental Innovation and Societal Transitions 1 (1), S. 135–139.

BAFA (Bundesamt für Wirtschaft und Ausfuhrkontrolle) (2017): Elektromobilität (Umweltbonus). Förderung elektrisch betriebener Fahrzeuge. Eschborn: BAFA. http://www.bafa.de/SharedDocs/Downloads/DE/Energie/emob_bafa_flyer.pdf;jsessionid=A9DDDE16DD4204ED8249E3593A45022B.2_cid362?__blob=publicationFile&v=4 (10.10.2017).

Bah, I. (2017): Sprengen, schreddern, zementieren. Neue Energie 27 (5), S. 48–52.

Barcham, R. (2014): Climate and Energy Impacts of Automated Vehicles. Berkeley, Calif.: Goldman School of Public Policy, University of California. https://www.arb.ca.gov/research/sustainable/automated_vehicles_climate_july2014_final1.pdf (25.07.2017).

Bardt, H. (2016): Deutsche Autoindustrie und autonomes Fahren. Wirtschaftsdienst 96 (10), S. 776–778.

Barker, T., Dagoumas, A., Rubin, J. (2009): The macroeconomic rebound effect and the world economy. Energy Efficiency 2 (4), S. 411–427.

Barth, S., Meerkamm, K. (2016): Allgemeine Vorschriften für den Ausbildungsverkehr? Transportrecht 39 (10), S. 381–386.

Bast, U., Blank, R., Buchert, M., Elwert, T., Finsterwalder, F., Hörnig, G. K., T., Langkau, S., Marscheider-Weidemann, F., Müller, J.-O., Thürigen, C., Treffer, F., Walter, T. (2014): Recycling von Komponenten und strategischen Metallen aus elektrischen Fahrantrieben. Abschlussbericht zum Verbundvorhaben. Kennwort: MORE (Motor Recycling). München, Stuttgart, Hanau, Erlangen, Clausthal-Zellerfeld, Darmstadt, Karlsruhe: Siemens, Daimler, Umicore, Vacuumschmelze, Universität Erlangen-Nürnberg, Lehrstuhl für Fertigungsautomatisierung und Produktionssystematik,Technische Universität Clausthal, Institut für Aufbereitung, Deponietechnik und Geomechanik, Öko-Institut, Fraunhofer-Institut für System- und Innovationsforschung ISI. http://edok01.tib.uni-hannover.de/edoks/e01fb15/826920594.pdf (24.07.2017).

Bastard, L. (2010): The Impact of Economic Instruments on the Auto Industry and the Consequences of Fragmenting Markets. Focus on the EU Case. Prepared for the Round Table of 18–19 February 2010 on Stimulating Low-Carbon Vehicle Technologies. Paris: OECD. Discussion Paper 2010-8.

Baumann Rechtsanwälte Partnerschaftsgesellschaft (2016): EU-Beschwerde zur Europäischen Kommission vom 26.08.2016. Beschwerdeführer: Bund für Umwelt und Naturschutz Deutschland e.V. (BUND) – Friends of the Earth Germany. Würzburg: Baumann Rechtsanwälte Partnerschaftsgesellschaft. https://www.bund.net/fileadmin/user_upload_bund/publikationen/mobilitaet/mobi-

Vorabfassung - wird durch die endgültige Fassung ersetzt.

litaet_beschwerde_eu_komission_bundesverkehrswegeplan.pdf (15.06.2017).

Baumeister, H. (Hrsg.) (2013): Recht des ÖPNV. Praxishandbuch für den Nahverkehr mit VO (ERG) Nr. 1370/2007, PBefG und den ÖPNV-Gesetzen der Länder. Bd. 1: Gesetze. Hamburg: DVV Media Group.

BBSR (Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung) (2017): Immer mehr Menschen pendeln zur Arbeit. Berlin: BBSR. http://www.bbsr.bund.de/BBSR/DE/Home/Topthemen/2017-pendeln.html (21.07.2017).

BBSR (2015): Indikatoren zur Nahversorgung. Bonn: BBSR. BBSR-Analysen Kompakt 10/2015.

BDL (Bundesverband der Deutschen Luftverkehrswirtschaft) (2017): Positionspapier. CORSIA: Globales marktbasiertes Klimaschutzinstrument für den internationalen Luftverkehr. Vorstellung und Positionierung. Berlin: BDL. https://www.bdl.aero/download/2407/bdl-positionspapier-zum-icao-klimaschutzinstrument-corsia.pdf (13.06.2017).

Beckers, T., Gizzi, F., Kreft, T., Hildebrandt, J. (2015): Effiziente Bereitstellung der (öffentlich zugänglichen) Ladeinfrastruktur für die Elektromobilität in Deutschland. Ökonomische Grundlagen, kurze Beurteilung des Status quo und zentrale Handlungsempfehlungen unter Berücksichtigung der europäischen Richtlinie 2014/94/EU. Berlin, Heidelberg, München/Ottobrunn, Leipzig: Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt, IFEU – Institut für Energie- und Umweltforschung, Ludwig-Bölkow-Systemtechnik, Deutsches Biomasseforschungszentrum. http://www.wip.tu-berlin.de/fileadmin/fg280/forschung/publikationen/2001/beckers_gizzi_kreft_hildebrandt_2015-bereitstellung_der_oeff_zugaengl_li_fuer_elektromobilitaet-v80.pdf (18.07.2017).

Beelen, R., Hoek, G., Brandt, P. A. van den, Goldbohm, R. A., Fischer, P., Schouten, L. J., Jerrett, M., Hughes, E., Armstrong, B., Brunekreef, B. (2008): Long-term effects of traffic-related air pollution on mortality in a Dutch cohort (NLCS-AIR study). Environmental Health Perspectives 116 (2), S. 196–202.

Bekken, J. T., Longva, F. (2003): Impact of Taxi Market Regulation. An International Comparison. London: Office of Fair Trading. TØI report 58/2003.

Bergk, F., Biemann, K., Heidt, C., Knörr, W., Lambrecht, U., Schmidt, T., Ickert, L., Schmied, M., Schmidt, P., Weindorf, W. (2016): Klimaschutzbeitrag des Verkehrs bis 2050. Dessau-Roßlau: Umweltbundesamt. UBA-Texte 56/2016.

Bergk, F., Knörr, W., Lambrecht, U. (2017): Klimaschutz im Verkehr: Neuer Handlungsbedarf nach dem Pariser Klimaschutzabkommen. Teilbericht des Projekts „Klimaschutzbeitrag des Verkehrs 2050". Dessau-Roßlau: Umweltbundesamt. UBA-Texte 45/2017.

Berrill, P., Arvesen, A., Scholz, Y., Gils, H. C., Hertwich, E. G. (2016): Environmental impacts of high penetration-renewable energy scenarios for Europe. Environmental Research Letters 11 (1). http://iopscience.iop.org/article/10.1088/1748-9326/11/1/014012/pdf (10.07.2017).

BGR (Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe) (o. J.-a): Geologische Übersichtskarte der Bundesrepublik Deutschland 1:200 000 (GÜK200) Hannover: BGR. http://www.bgr.bund.de/DE/Themen/Sammlungen-Grundlagen/GG_geol_Info/Karten/Deutschland/GUEK200/guek200_inhalt.html (13.07.2011).

BGR (o. J.-b): Rohstoffverfügbarkeit. Hannover: BGR. https://www.bgr.bund.de/DE/Themen/Min_rohstoffe/Rohstoffverfuegbarkeit/rohstoffverfuegbarkeit_node.html;jsessionid=0A28026D6933183B24D487412CBCA676.1_cid284 (10.07.2017).

BINE Informationsdienst (2017): Elektromobilität Was uns jetzt und künftig antreibt: Batterie-, Brennstoffzellen- und Hybridantrieb. Bonn: BINE Informationsdienst. Themeninfo 1/2017. https://www.bine.info/fileadmin/content/Publikationen/Themen-Infos/I_2017/themen_0117_internetx.pdf (24.07.2017).

Bishop, J. D. K., Axon, C. J., Bonilla, D., Tran, M., Banister, D., McCulloch, M. D. (2013): Evaluating the Impact of V2G Services on the Degradation of Batteries in PHEV and EV. Applied Energy 111, S. 206–218.

Blagoeva, D. T., Patrícia Aves Dias, P., Marmier, A., Pavel, C. C. (2016): Assessment of potential bottlenecks along the materials supply chain for the future deployment of low-carbon energy and transport technologies in the EU. Wind Power, photovoltaic and electric vehicles technologies, time frame 2015–2030. Luxembourg: Publications Office of the European Union. JRC Science for Policy Report EUR 28192 EN.

Blanck, R., Kasten, P., Hacker, F., Mottschall, M. (2013): Treibhausgasneutraler Verkehr 2050: Ein Szenario zur

Vorabfassung - wird durch die endgültige Fassung ersetzt.

zunehmenden Elektrifizierung und dem Einsatz stromerzeugter Kraftstoffe im Verkehr Abschlussbericht im Auftrag des Umweltbundesamtes zum Forschungsvorhaben „Verkehr 2050 – Entwicklung von Parametern und Skizzierung eines vereinfachten Energie- und Emissionsszenarios“. Freiburg, Darmstadt, Berlin: Öko-Institut.

Blanck, R., Zimmer, W. (2016): Sektorale Emissionspfade in Deutschland bis 2050 – Verkehr. Arbeitspaket 1.2 im Forschungs- und Entwicklungsvorhaben des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit: Wissenschaftliche Unterstützung „Erstellung und Begleitung des Klimaschutzplans 2050“. (FKZ UM 15 41 1860). Berlin: Öko-Institut.

BMBF (Bundesministerium für Bildung und Forschung) (2017): Mein Auto kann mehr. Forschung für das autonome elektrische Fahren. Bonn: BMBF.

BMU (Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit) (2012): Deutsches Ressourceneffizienzprogramm (ProgRess). Programm zur nachhaltigen Nutzung und zum Schutz der natürlichen Ressourcen. Berlin: BMU. http://www.emas.de/fileadmin/user_upload/06_service/PDF-Dateien/BMU_ProgRess_2012.pdf (10.09.2015).

BMU, BMWi (Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie) (2011): Das Energiekonzept der Bundesregierung 2010 und die Energiewende 2011 Berlin: BMWi, BMU. http://www.bmu.de/fileadmin/bmu-import/files/pdfs/allgemein/application/pdf/energiekonzept_bundesregierung.pdf (22.07.2013).

BMUB (Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit) (2016a): Den ökologischen Wandel gestalten. Integriertes Umweltprogramm 2030. Berlin: BMUB.

BMUB (2016b): Deutsches Ressourceneffizienzprogramm II. Programm zur nachhaltigen Nutzung und zum Schutz der natürlichen Ressourcen. Vom Bundeskabinett am 2. März 2016 beschlossen. Berlin: BMUB.

BMUB (2016c): Klimaschutzplan 2050. Klimaschutzpolitische Grundsätze und Ziele der Bundesregierung. Berlin: BMUB. http://www.bmub.bund.de/fileadmin/Daten_BMU/Download_PDF/Klimaschutz/klimaschutzplan_2050_bf.pdf (27.09.2016).

BMUB, UBA (Umweltbundesamt) (2017): Umweltbewusstsein in Deutschland 2016. Ergebnisse einer repräsentativen Bevölkerungsumfrage. Berlin, Dessau-Roßlau: BMUB, UBA.

BMVBS (Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung) (2012): Konzept zur Öffentlichkeitsbeteiligung im Rahmen der Erarbeitung des Bundesverkehrswegeplans. Berlin: BMVBS.

BMVBW (Bundesministerium für Verkehr, Bau und Wohnungswesen) (2003): Bundesverkehrswegeplan 2003. Grundlagen für die Zukunft der Mobilität in Deutschland. Berlin: BMVBW.

BMVI (Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur) (2017a): Bekanntmachung Förderrichtlinie. Ladeinfrastruktur für Elektrofahrzeuge in Deutschland. Berlin: BMVI. http://www.bmvi.de/SharedDocs/DE/Anlage/G/foerderrichtlinie-ladeinfrastruktur-fuer-fahrzeuge-in-deutschland.pdf?__blob=publicationFile (18.07.2017).

BMVI (2017b): Erfolgreicher Start für Bundesprogramm Ladeinfrastruktur / Hamburg erhält ersten Förderbescheid. Berlin: BMVI. https://www.bmvi.de/SharedDocs/DE/Artikel/G/bundesprogramm-ladeinfrastruktur-hamburg-foerderbescheid.html?nn=12830 (18.07.2017).

BMVI (2016a): Bundesverkehrswegeplan 2030. Berlin: BMVI.

BMVI (2016b): Forschungsprogramm zur Automatisierung und Vernetzung im Straßenverkehr. Berlin: BMVI. https://www.bmvi.de/SharedDocs/DE/Anlage/Digitales/forschungsprogramm-avf.pdf (26.07.2017).

BMVI (2016c): Nationaler Strategierahmen über den Aufbau der Infrastruktur für alternative Kraftstoffe als Teil der Umsetzung der Richtlinie 2014/94/EU. Berlin: BMVI. http://www.bmvi.de/SharedDocs/DE/Anlage/VerkehrUndMobilitaet/nationaler-strategierahmen-ueberden-aufbau-infrastruktur-alternative-rohstoffe.pdf?__blob=publicationFile (18.07.2017).

BMVI (2016d): Verkehr in Zahlen 2016/2017. Hamburg: DVV Media Group. http://www.bmvi.de/SharedDocs/DE/Publikationen/K/verkehr-in-zahlen-2016-2017.pdf?__blob=publicationFile (06.12.2016).

BMVI (2016e): Verkehr und Mobilität in Deutschland – Daten und Fakten kompakt. Stand: Juli 2016. BMVI. http://www.bmvi.de/SharedDocs/DE/Publikationen/G/verkehr-und-mobilitaet-in-deutschland.html (20.07.2017).

Vorabfassung - wird durch die endgültige Fassung ersetzt.

BMVI (2013): Die Mobilitäts- und Kraftstoffstrategie der Bundesregierung (MKS). Energie auf neuen Wegen. Berlin: BMVI.

BMVI, BMUB, BMF (Bundesministerium der Finanzen), BMWi (Bundesministerium für Wirtschaft und Energie), BMBF, Ministerpräsidentinnen und Ministerpräsidenten von Baden-Württemberg, Bayern, Hessen, Niedersachsen, Nordrhein-Westfalen, Rheinland-Pfalz, des Saarlandes sowie des Regierenden Bürgermeisters von Berlin und des Ersten Bürgermeisters von Hamburg (2017): Erklärung anlässlich des Gesprächs im Rahmen des „Nationalen Forum Diesel" mit Vertretern der Automobilindustrie am 2. August 2017. Berlin: BMUB. https://www.bundesregierung.de/Content/DE/_Anlagen/2017/08/2017-08-02-forum-diesel.pdf?__blob=publicationFile&v=1 (08.09.2017).

BMVIT (Bundesministerium für Verkehr, Innovation und Technologie) (2012): Gesamtverkehrsplan für Österreich. Wien: Bundesministerium für Verkehr Innovation und Technologie. https://www.bmvit.gv.at/verkehr/gesamtverkehr/gvp/downloads/gvp_gesamt.pdf (18.07.2017).

BMW AG (Bayerische Motoren Werke Aktiengesellschaft), DLR (Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt), DB Rent, Landeshauptstadt München, Universität der Bundeswehr München, Senatsverwaltung für Stadtentwicklung und Umwelt Berlin (2016): Wirkung von E-Car Sharing Systemen auf Mobilität und Umwelt in urbanen Räumen (WiMobil). Laufzeit: 01.09.2012 – 31.10.2015. Gemeinsamer Abschlussbericht. Berlin: BMUB. http://www.erneuerbar-mobil.de/sites/default/files/2016-10/Abschlussbericht_WiMobil.pdf (14.06.2017).

BMWi (Bundesministerium für Wirtschaft und Energie) (2017): Maritime Agenda 2025. Für die Zukunft des maritimen Wirtschaftsstandortes Deutschland. Berlin: BMWi. http://www.bmwi.de/Redaktion/DE/Publikationen/Wirtschaft/maritime-agenda-2025.pdf?__blob=publicationFile&v=16 (01.08.2017).

BMWi (2016): Fünfter Monitoring-Bericht „Energie der Zukunft". Berichtsjahr 2015. Berlin: BMWi.

BMWi (2015a): Energieeffizienzstrategie Gebäude. Wege zu einem nahezu klimaneutralen Gebäudebestand. Berlin: BMWi. https://www.bmwi.de/Redaktion/DE/Publikationen/Energie/energieeffizienzstrategie-gebaeude.pdf?__blob=publicationFile&v=23 (07.01.2016).

BMWi (2015b): Offshore-Windenergie. Ein Überblick über die Aktivitäten in Deutschland. Ein gutes Stück Arbeit. Berlin: BMWi. https://www.bmwi.de/Redaktion/DE/Publikationen/Energie/offshore-windenergie.pdf?__blob=publicationFile&v=7 (21.07.2017).

BMWi (2010): Rohstoffstrategie der Bundesregierung. Sicherung einer nachhaltigen Rohstoffversorgung Deutschlands mit nicht-energetischen mineralischen Rohstoffen. Berlin: BMWi.

BMWi, BMU (2010): Energiekonzept für eine umweltschonende, zuverlässige und bezahlbare Energieversorgung. Berlin: BMWi, BMU.

BMZ (Bundesministerium für wirtschaftliche Zusammenarbeit und Entwicklung) (2011): Entwicklungspolitisches Strategiepapier Extraktive Rohstoffe. Bonn, Berlin: BMZ. BMZ-Strategiepapier 4/2010.

BNEF (Bloomberg New Energy Finance) (2017): Electric Vehicle Outlook 2017. Bloomberg New Energy Finance's annual long-term forecast of the world's electric vehicle market. New York: BNEF.

Bows-Larkin, A., Mander, S., Gilbert, P., Traut, M., Walsh, C., Anderson, K. (2014): High Seas, High Stakes, High Seas. Final Report. Manchester: Tyndall Centre for Climate Change Research. http://www.mace.manchester.ac.uk/media/eps/schoolofmechanicalaerospaceandcivilengineering/research/centres/tyndall/pdf/High_Seas_High_Stakes_High_Seas_Project_Final_Report.pdf (26.07.2017).

Brasseur, G., Jacob, D., Schuck-Zöller, S. (Hrsg.) (2017): Klimawandel in Deutschland. Entwicklung, Folgen, Risiken und Perspektiven. Berlin, Heidelberg: Springer.

Brenke, K. (2016): Home Office: Möglichkeiten werden bei weitem nicht ausgeschöpft. DIW Wochenbericht 83 (5), S. 95–105.

Bressi, M., Sciare, J., Ghersi, V., Mihalopoulos, N., Petit, J.-E., Nicolas, J. B., Moukhtar, S., Rosso, A., Féron, A., Bonnaire, N., Poulakis, E., Theodosi, C. (2014): Sources and geographical origins of fine aerosols in Paris (France). Atmospheric Chemistry and Physics 14, S. 8813–8839.

Brosowski, A., Adler, P., Erdmann, G., Stinner, W., Thrän, D., Mantau, U., Blanke, C., Mahro, B., Hering, T., Reinholdt, G. (2015): Biomassepotenziale von Test- und Ab-

Vorabfassung - wird durch die endgültige Fassung ersetzt.

fallstoffen. Status quo in Deutschland. Gülzow-Prüzen: Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe. Schriftenreihe Nachwachsende Rohstoffe 36.

Brown, A., Gonder, J., Repac, B. (2014): An Analysis of Possible Energy Impacts of Automated Vehicle. In: Meyer, G., Beiker, S. (Hrsg.): Road Vehicle Automation. Cham: Springer International Publishing, S. 137–153.

Brunekreeft, G., Buchmann, M., Meyer, R. (2016): The Rise of Third Parties and the Fall of Incumbents Driven by Large-Scale Integration of Renewable Energies: The Case of Germany. Energy Journal 37, S. 243–262.

BSH (Bundesamt für Seeschifffahrt und Hydrographie) (2017): Bestand der nach §7 FIRG ausgeflaggten Handelsschiffe ab BRZ 100 (Bareboat-Charter). Stand: 30.09.2017. Hamburg: BSH. http://www.bsh.de/de/Schifffahrt/Berufsschifffahrt/Deutsche_Handelsflotte/Statistik_BBC.pdf (09.10.2017).

Buchert, M. (2016): Material needs for greenhouse gas neutral mobility systems. Vortrag, Conference on Decarbonisation and Resource Efficiency – 100% Renewable Energy and more, 08.11.2017, Berlin.

Buchert, M. (2011): Rare Earths – a Bottleneck for future Wind Turbine Technologies? Vortrag, Conference „Wind Turbine Supply Chain and Logistics“, 29.08.2011, Berlin.

Buchert, M., Jenseit, W., Dittrich, S., Hacker, F., Schüler-Hainsch, E., Ruhland, K., Knöfel, S., Goldmann, D., Rasenack, K., Treffer, F. (2011a): Ressourceneffizienz und ressourcenpolitische Aspekte des Systems Elektromobilität. Arbeitspaket 7 des Forschungsvorhabens OPTUM: Optimierung der Umweltentlastungspotenziale von Elektrofahrzeugen. Anhang zum Schlussbericht. Berlin, Darmstadt, Freiburg: Öko-Institut. https://www.oeko.de/uploads/oeko/oekodoc/1334/2011-449-de.pdf (21.07.2017).

Buchert, M., Jenseit, W., Merz, C., Schüler, D. (2011b): Ökobilanz zum „Recycling von Lithium-Ionen-Batterien“ (LithoRec). Endbericht. Freiburg, Darmstadt, Berlin: Öko-Institut. https://www.oeko.de/uploads/oeko/oekodoc/1500/2011-068-de.pdf (21.07.2017).

Bulach, W., Schüler, D., Sellin, G., Elwert, T., Schmid, D., Goldmann, D., Buchert, M., Kammer, U. (2017): Elektrofahrzeugrecycling 2020. Schlüsselkomponente Leistungselektronik. In: Thomé-Kozmiensky, K. J., Goldmann, D. (Hrsg.): Recycling und Rohstoffe. Bd. 10. Neuruppin: TK Verlag Karl J. Thomé-Kozmiensky, S. 339–355.

BUND (Bund für Umwelt und Naturschutz Deutschland) (2017): Grünbuch nachhaltige Verkehrsinfrastrukturplanung. Zur Transformation des Bundesverkehrswegeplans 2030. Berlin: BUND. https://www.bund.net/fileadmin/user_upload_bund/publikationen/mobilitaet/mobilitaet_gruenbuch_bvwp.pdf (18.07.2017).

BUND (2016): Stellungnahme des BUND Bundesverbandes zum Bundesverkehrswegeplan 2030 mit unmittelbarem Bezug zu einem oder mehreren Einzelprojekten. Berlin: BUND.

Bundesrat (2016): Gesetzentwurf des Bundesrates. Entwurf eines Gesetzes zur Änderung des Wohnungseigentumsgesetzes und des Bürgerlichen Gesetzbuchs zur Förderung der Barrierefreiheit und Elektromobilität. Berlin: Bundesrat. Bundesratsdrucksache 340/16.

Bundesrechnungshof (2017): Gutachten des Bundesbeauftragten für Wirtschaftlichkeit in der Verwaltung zu Organisationsformen und Finanzierungsvarianten für die Bundesfernstraßen. Stuttgart: Kohlhammer. Schriftenreihe des Bundesbeauftragten für Wirtschaftlichkeit in der Verwaltung 20.

Bundesregierung (2017): Deutsche Nachhaltigkeitsstrategie. Neuauflage 2016. Stand: 1. Oktober 2016, Kabinettbeschluss vom 11. Januar 2017. Berlin: Bundesregierung.

Bundesregierung (2015): Strategie automatisiertes und vernetztes Fahren. Leitanbieter bleiben, Leitmarkt werden, Regelbetrieb einleiten. Berlin: Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur. https://www.bmvi.de/SharedDocs/DE/Publikationen/DG/broschuere-strategie-automatisiertes-vernetztes-fahren.pdf?__blob=publicationFile (26.07.2017).

Bundesregierung (2009): Nationaler Entwicklungsplan Elektromobilität der Bundesregierung. Berlin: Bundesregierung.

Bundesregierung (2007): Elemente einer Rohstoffstrategie der Bundesregierung. Bonn: Bundesregierung. http://www.bmwi.de/BMWi/Redaktion/PDF/E/elemente-rohstoffstrategie,property=pdf,bereich=bmwi,sprache=de,rwb=true.pdf (08.03.2010).

Vorabfassung - wird durch die endgültige Fassung ersetzt.

Bunge, R., Stäubli, A. (2014): Metalle. Reserven, Preise, Umwelt. In: Thomé-Kozmiensky, K. J., Goldmann, D. (Hrsg.): Recycling und Rohstoffe. Bd. 7. Neuruppin: TK Verlag Karl J. Thomé-Kozmiensky, S. 269–288.

Bünger, U., Landinger, H., Pschorr-Schoberer, E., Schmidt, P., Weindorf, W., Jöhrens, J., Lambrecht, U., Naumann, K., Lischke, A. (2014): Power-to-Gas (PtG) im Verkehr. Aktueller Stand und Entwicklungsperspektiven. Kurzstudie im Rahmen des Auftrags Wissenschaftliche Begleitung, Unterstützung und Beratung des BMVBS in den Bereichen Verkehr und Mobilität mit besonderem Fokus auf Kraftstoffen und Antriebstechnologien sowie Energie und Klima. Heidelberg, Berlin, Ottobrunn, Leipzig: Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt, IFEU – Institut für Energie- und Umweltforschung, Ludwig-Bölkow-Systemtechnik, Deutsches Biomasseforschungszentrum. http://www.bmvi.de/SharedDocs/DE/Anlage/MKS/mks-kurzstudie-ptg.pdf?__blob=publicationFile (02.08.2017).

Bunz, M., Mücke, H.-G. (2017): Klimawandel – physische und psychische Folgen. Bundesgesundheitsblatt – Gesundheitsforschung – Gesundheitsschutz 60 (6), S. 632–639.

BVU Beratergruppe Verkehr + Umwelt, Intraplan Consult, Ingenieurgruppe IVV, Planco Consulting (2014): Verkehrsverflechtungsprognose 2030. Schlussbericht. Freiburg, München, Aachen, Essen: BVU Beratergruppe Verkehr + Umwelt, Intraplan Consult, Ingenieurgruppe IVV, Planco Consulting. 96.0981/2011.

Cambridge Econometrics (2014): The Impact of Including the Road Transport Sector in the EU ETS. A report for the European Climate Foundation. Cambridge: Cambridge Econometrics. www.ebb-eu.org/EBBpressreleases/Cambridge_ETS_transport_Study.pdf (04.08.2017).

Cames, M., Graichen, J., Siemons, A., Cook, V. (2015): Emission reduction targets for international aviation and shipping. Brüssel: Europäisches Parlament, Policy Department A: Economic and Scientific Policy. IP/A/ENVI/2015-11. http://www.europarl.europa.eu/RegData/etudes/STUD/2015/569964/IPOL_STU(2015)569964_EN.pdf (18.07.2017).

Campbell, A., Doswald, N. (2009): The impacts of biofuel production on biodiversity: A review of the current literature. Cambridge: United Nations Environment Programme World Conservation Monitoring Centre.

Chahoud, T., Henseling, K.-O., Burger, A., Hain, B. (1999): Mineralische Rohstoffe und nachhaltige Entwicklung. Hannover: Schweizerbart. Geologisches Jahrbuch / SH, Reihe H: Wirtschaftsgeologie, Berichte zur Rohstoffwirtschaft 11.

Ciacci, L., Reck, B. K., Nassar, N. T., Graedel, T. E. (2015): Lost by Design. Environmental Science & Technology 49 (16), S. 9443–9451.

COGEA (Consulenti per la Gestione Aziendale) (2017): Study on differentiated port infrastructure charges to promote environmentally friendly maritime transport activities and sustainable transporttation. Final report. Brüssel: Europäische Kommission. https://ec.europa.eu/transport/sites/transport/files/2017-06-differentiated-port-infrastructure-charges-report.pdf (09.10.2017).

Conti (2017): Continuität & Leistung – seit 1970. München: Conti Reederei. https://www.conti-online.de/unternehmen/geschichte.html (11.07.2017).

Cowart, R., Buck, M., Carp, S. (2017): Aligning Europe's Policies for Carbon, Efficiency, and Renewables: Creating a „Virtuous Cycle" of Performance and Emissions Reduction. Montpelier, Berlin, London: Regulatory Assistance Project, Agora Energiewende, Sandbag. http://www.raponline.org/wp-content/uploads/2017/06/rap-cowart-buck-carp-aligning-europe-policies-virtuous-cycle-2017-june-final.pdf (30.07.2017).

D'Haultfœuille, X., Givord, P., Boutin, X. (2014): The Environmental Effect of Green Taxation: The Case of the French Bonus/Malus. The Economic Journal 124 (578), S. F444-F480.

The Danish Ecocouncil (2011): Cleaner Shipping – focus on air pollution, technology and regulation. Kopenhagen: The Danish Ecocouncil. http://ecocouncil.dk/documents/publikationer/1323-130730-shipping-uk/file (26.07.2017).

DCTI (Deutsches CleanTech Institut) (2015): Klimafreundlich einkaufen. Eine vergleichende Betrachtung von Onlinehandel und stationärem Einzelhandel. Bonn: DCTI. https://www.ottogroup.com/media/docs/de/studien/Studie_Klimafreundlich_Einkaufen.pdf (26.07.2017).

Degreif, S., Buchert, M., Bulach, W., Behrendt, S., Müller, F. (2017): Substitution als Strategie zur Minderung der Kritikalität von Rohstoffen für Umwelttechnologine. In:

Vorabfassung - wird durch die endgültige Fassung ersetzt.

Thomé-Kozmiensky, K. J., Goldmann, D. (Hrsg.): Recycling und Rohstoffe. Bd. 10. Neuruppin: TK Verlag Karl J. Thomé-Kozmiensky, S. 65–84.

Dehoust, G., Manhart, A., Möck, A., Kießling, L., Vogt, R., Kämper, C., Giegrich, J., Auberger, A., Priester, M., Rechlin, A., Dolega, P. (2017): Erörterung ökologischer Grenzen der Primärrohstoffgewinnung und Entwicklung einer Methode zur Bewertung der ökologischen Rohstoffverfügbarkeit zur Weiterentwicklung des Kritikalitätskonzeptes (ÖkoRess I). Konzeptband. Dessau-Roßlau: Umweltbundesamt. UBA-Texte 87/2017.

Delgado, O., Miller, J., Sharpe, B., Muncrief, R. (2016): Estimating the fuel efficiency technology potential of heavy-duty trucks in major markets around the world. Washington, DC, Berlin: Global Fuel Economy Initiative, International Council on Clean Transportation. Working Paper 14. https://www.globalfueleconomy.org/media/404893/gfei-wp14.pdf (14.09.2017).

Delgado, O., Rodríguez, F., Muncrief, R. (2017): Fuel efficiency technology in European heavy-duty vehicles: Baseline and potential for the 2020–2030 timeframe. Washington, DC: International Council on Clean Transportation. http://www.theicct.org/EU-HDV-fuel-efficiency-tech-2020-2030 (08.09.2017).

Deuber, O. (2002): Einbeziehung des motorisierten Individualverkehrs in ein deutsches CO_2-Emissionshandelssystem. Freiburg: Öko-Institut.

Deutsche Verkehrs-Zeitung (07.08.2014): Die Großen verdrängen die Kleinen. http://www.dvz.de/rubriken/seefracht/single-view/nachricht/grafiken-die-grossen-verdraengen-die-kleinen.html (07.09.2017).

Deutscher Bundestag (2017): Gesetzentwurf des Bundesrates. Entwurf eines Gesetzes zur Änderung des Wohnungseigentumsgesetzes und des Bürgerlichen Gesetzbuchs zur Förderung der Barrierefreiheit und Elektromobilität. Berlin: Deutscher Bundestag. Bundestagsdrucksache 18/10256.

Deutscher Bundestag (2015): Antwort der Bundesregierung auf die Kleine Anfrage der Abgeordneten Hebert Behrens, Caren Lay, Eva Bulling-Schröter, weiterer Abgeordneter und der Fraktion DIE LINKE. Schnellladestationen an Raststätten. Berlin: Deutscher Bundestag. Bundestagsdrucksache 18/6143.

Deutschländer, T., Mächel, H. (2017): Temperatur inklusive Hitzewellen. In: Brasseur, G., Jacob, D., Schuck-Zöller, S. (Hrsg.): Klimawandel in Deutschland. Entwicklung, Folgen, Risiken und Perspektiven. Berlin, Heidelberg: Springer, S. 47–56.

Díaz, S., Miller, J., Mock, P., Minjares, R., Anenberg, S., Meszler, D. (2017): Shifting gears: The effects of a future decline in diesel market share on tailpipe CO_2 and NO_x emissions in Europe. Washington, DC: International Council on Clean Transportation. Fact Sheet: Europe.

Diekmann, L., Gerhards, E., Klinski, S., Meyer, B., Schmidt, S., Thöne, M. (2011): Steuerliche Behandlung von Firmenwagen in Deutschland. Köln: Finanzwissenschaftliches Forschungsinstitut an der Universität zu Köln. FIFO-Berichte 13.

Dijk, M., Orsato, R. J., Kemp, R. (2013): The emergence of an electric mobility trajectory. Energy Policy 52, S. 135–145.

Dünnebeil, F., Lambrecht, U., Goletz, M., Zittel, W., Schmidt, P., Müller-Langer, F., Naumann, K. (2013): Analyse aktueller Szenarien zur Entwicklung des Verkehrs in Deutschland und dessen Umweltwirkungen. Kurzstudie im Rahmen der Wissenschaftlichen Begleitung, Unterstützung und Beratung des BMVBS in den Bereichen Verkehr und Mobilität mit besonderem Fokus auf Kraftstoffen und Antriebstechnologien sowie Energie und Klima. Heidelberg, Berlin, Ottobrunn, Leipzig: Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt, IFEU – Institut für Energie- und Umweltforschung, Ludwig-Bölkow-Systemtechnik, Deutsches Biomasseforschungszentrum. http://www.bmvi.de/SharedDocs/DE/Anlage/MKS/mks-kurzstudie-szenarien.pdf?__blob=publicationFile (02.08.2017).

Dünnebeil, F., Reinhard, C., Lambrecht, U., Kies, A., Hausberger, S., Rexeis, M. (2015): Zukünftige Maßnahmen zur Kraftstoffeinsparung und Treibhausgasminderung bei schweren Nutzfahrzeugen. Dessau-Roßlau: Umweltbundesamt. UBA-Texte 32/2015.

e-mobil BW (Landesagentur für Elektromobilität und Brennstoffzellentechnologie Baden-Württemberg), Ministerium für Finanzen und Wirtschaft Baden-Württemberg, Ministerium für Wissenschaft, Forschung und Kunst Baden-Württemberg, Fraunhofer IPA (Fraunhofer-Institut für Produktionstechnik und Automatisierung), Fraunhofer IBP (Fraunhofer-Institut für Bauphysik), Fraunhofer ITEM (Fraunhofer-Institut für Toxikologie

Vorabfassung - wird durch die endgültige Fassung ersetzt.

und Experimentelle Medizin) (2012): Leichtbau in Mobilität und Fertigung. Ökologische Aspekte. Stuttgart: e-mobil BW. http://www.e-mobilbw.de/service/publikationen.html?file=files/e-mobil/content/DE/Publikationen/PDF/Leichtbau-Studie-Oekologische-Aspekte-150.pdf (10.07.2017).

Ecke, J., Klein, S., Klein, S. W., Steinert, T. (2017): Klimaschutz durch Sektorenkopplung: Optionen, Szenarien, Kosten. Eine enervis-Studie. Berlin: enervis energy advisors.

Eckert, R. (2017): Ein zweites Leben für Carbonfasern. Entsorga 36 (3). http://www.entsorga-magazin.de/Default.asp?Ausgabe=29096&Jahrgang=1138&Menue=3&ArtikelPPV=29096 (21.07.2017).

Ecofys (2016a): Alternative Finanzierung des EEG-Umlagekontos. München: Bayerischer Industrie- und Handelskammertag, Verband der Bayerischen Energie- und Wasserwirtschaft.

Ecofys (2016b): Flex-Efficiency. Ein Konzept zur Integration von Effizienz und Flexibilität bei industriellen Verbrauchern. Studie im Auftrag von Agora Energiewende. Berlin: Agora Energiewende. Impulse.

EEA (European Environment Agency) (2017): CDR. Germany. European Union (EU) obligations. Greenhouse gas Monitoring Mechanism Regulation (MMR). Art. 05 & 07 and UNFCCC – Greenhouse gas inventories. GHG inventories. GHG Inventory EU 15-01-2017. DEU_2017_2015_11012017_101416.xlsx. Copenhagen: EEA, European Environment Information and Observation Network EIONET. http://cdr.eionet.europa.eu/de/eu/mmr/art07_inventory/ghg_inventory/envwhvj6g/DEU_2017_2015_11012017_101416.xlsx (04.10.2017).

EEA (2016): Air quality in Europe – 2016 report. Luxembourg: Publications Office of the European Union. EEA Report 28/2016.

EEA (2014): Noise in Europe 2014. Luxembourg: Publications Office of the European Union. EEA Report 10/2014.

EFB (Europäische Forschungsgesellschaft für Blechverarbeitung) (2012): HyBlade. Project Summary. Hannover: EFB. https://cornet.efb.de/publications.html (14.09.2017).

Eis, D., Helm, D., Laußmann, D., Stark, K. (2010): Klimawandel und Gesundheit. Ein Sachstandsbericht. Berlin: Robert Koch-Institut.

Elliott, J., Deryng, D., Müller, C., Frieler, K., Konzmann, M., Gerten, D., Glotter, M., Flörke, M., Wada, Y., Best, N., Eisner, S., Fekete, B. M., Folberth, C., Foster, I., Gosling, S. N., Haddeland, I., Khabarov, N., Ludwig, F., Masaki, Y., Olin, S., Rosenzweig, C., Ruane, A. C., Satoh, Y., Schmid, E., Stacke, T., Tang, Q., Wisser, D. (2014): Constraints and potentials of future irrigation water availability on agricultural production under climate change. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America 111 (9), S. 3239–3244.

Elmer, C.-F. (2016): The Economics of Vehicle CO_2 Emissions Standards and Fuel Economy Regulations: Rationale, Design, and the Electrification Challenge. Berlin, Technische Universität Berlin, Fakultät Wirtschaft und Management, Dissertation.

Elmer, C.-F., Faulstich, M., Hey, C. (2015): Der Klimabeitrag als Teil des Paradigmenwechsels der internationalen Klimapolitik. Ökonomisches Optimum oder Realweltanalyse. ifo Schnelldienst 68 (14), S. 18–22.

Elshkaki, A., Graedel, T. E. (2015): Solar cell metals and their hosts: A tale of oversupply and undersupply. Applied Energy 158, S. 167–177.

Elshkaki, A., Graedel, T. E. (2014): Dysprosium, the balance problem, and wind power technology. Applied Energy 136, S. 548-559.

Elwert, T., Goldmann, D., Römer, F., Buchert, M., Schüler, D. (2016): Aktuelle Entwicklungen und Herausforderungen beim Recycling von Elektro- und Hybridfahrzeugen. In: Thomé-Kozmiensky, K. J., Goldmann, D. (Hrsg.): Recycling und Rohstoffe. Bd. 9. Berlin: TK Verlag Karl J. Thomé-Kozmiensky, S. 275–294.

enervis energy advisors (2016): Optionen zur steuerlichen Finanzierung eines Energiewendefonds. Ergebnispapier. Berlin: Verbraucherzentrale Bundesverband. http://www.vzbv.de/sites/default/files/downloads/2017/03/28/langfassung_gutachten_steuerliche_optionen_finanzierung_energiewendefonds.pdf (08.09.2017).

Erhard, J., Reh, W., Treber, M., Oeliger, D., Rieger, D., Müller-Görnert, M. (2014): Klimafreundicher Verkehr in Deutschland. Weichenstellungen bis 2050. Berlin:

Vorabfassung - wird durch die endgültige Fassung ersetzt.

WWF Deutschland, Bund für Umwelt und Naturschutz Deutschland, Germanwatch, Naturschutzbund Deutschland, Verkehrsclub Deutschland.

Ericsson, M., Söderholm, P. (2010): Mineral Depletion and Peak Production. Dundee: University of Dundee, Centre for Energy, Petroleum and Mineral Law and Policy. POLINARES working paper 7.

Ernst, C.-S., Olschewski, I., Eckstein, L., Harter, C. (2014): CO_2-Emissionsreduktion bei Pkw und leichten Nutzfahrzeugen nach 2020. Abschlussbericht 123320. Dienstleistungsprojekt 59/12. Studie im Auftrag des Bundesministeriums für Wirtschaft und Energie. Aachen: Institut für Kraftfahrzeuge – RWTH Aachen.

Europäische Kommission – Generaldirektion Binnenmarkt Industrie, Unternehmertum und KMU (2016): Raw Materials Scoreboard. European Innovation Partnership on Raw Materials. Luxembourg: Publications Office of the European Union.

Europäische Kommission (2017a): Europe on the Move: Commission takes action for clean, competitive and connected mobility. Brüssel: Europäische Kommission. https://ec.europa.eu/transport/modes/road/news/2017-05-31-europe-on-the-move_en (17.07.2017).

Europäische Kommission (2017b): Mitteilung der Kommission an das Europäische Parlament, den Rat, den Europäischen Wirtschafts- und Sozialausschuss und den Ausschuss der Regionen über die Liste kritischer Rohstoffe für die EU 2017. COM(2017) 490 final. Brüssel: Europäische Kommission.

Europäische Kommission (2017c): Vorschlag für eine Richtlinie des Europäischen Parlaments und des Rates zur Änderung der Richtlinie 1999/62/EG über die Erhebung von Gebühren für die Benutzung bestimmter Verkehrswege durch schwere Nutzfahrzeuge. KOM(2017) 275 final. Brüssel: Europäische Kommission.

Europäische Kommission (2015): Mitteilung der Kommission an das Europäische Parlament, den Rat, den Europäischen Wirtschafts- und Sozialausschuss und den Ausschuss der Regionen. Den Kreislauf schließen – Ein Aktionsplan der EU für die Kreislaufwirtschaft. COM(2015) 614 final. Brüssel: Europäische Kommission.

Europäische Kommission (2014a): Mitteilung der Kommission an das Europäische Parlament, den Rat, den Europäischen Wirtschafts- und Sozialausschuss und den Ausschuss der Regionen über die Überprüfung der Liste kritischer Rohstoffe für die EU und die Umsetzung der Rohstoffinitiative {SWD(2014) 171 final}. COM(2014) 297 final. Brüssel: Europäische Kommission.

Europäische Kommission (2014b): Raw Materials Information System (RMIS). Ispra: Europäische Kommission, Joint Research Centre. http://rmis.jrc.ec.europa.eu/ (26.06.2017).

Europäische Kommission (2011a): Communication from the Commission to the European Parliament, the Council, the European economic and social Commitee and the Commitee of the Regions. A Roadmap for moving to a competitive low carbon economy in 2050. COM(2011) 112 final. Brüssel: Europäische Kommission.

Europäische Kommission (2011b): Mitteilung der Kommission an das Europäische Parlament, den Rat, den Europäischen Wirtschafts- und Sozialausschuss und den Ausschuss der Regionen. Grundstoffmärkte und Rohstoffe: Herausforderungen und Lösungsansätze. KOM(2011) 25 endg. Brüssel: Europäische Kommission.

Europäische Kommission (2011c): Weissbuch. Fahrplan zu einem einheitlichen europäischen Verkehrsraum – Hin zu einem wettbewerbsorientierten und ressourcenschonenden Verkehrssystem. KOM(2011) 144 endg. Brüssel: Europäische Kommission.

Europäische Kommission (2008): Mitteilung der Kommission an das Europäische Parlament und den Rat. Die Rohstoffinitiative: Sicherung der Versorgung Europas mit den für Wachstum und Beschäftigung notwendigen Gütern. KOM(2008) 699 endg. Brüssel: Europäische Kommission.

Europäische Kommission (2005): Mitteilung der Kommission an den Rat, das Europäische Parlament, den Europäischen Wirtschafts- und Sozialausschuss und den Ausschuss der Regionen. Thematische Strategie für eine nachhaltige Nutzung natürlicher Ressourcen. {SEK(2005) 1683} {SEK(2005) 1684}. KOM(2005) 670 endg. Brüssel: Europäische Kommission.

Europäischer Rat (2014): Tagung des Europäischen Rates (23./24. Oktober 2014). Schlussfolgerungen zum Rahmen für die Klima- und Energiepolitik bis 2030. Brüssel: Europäischer Rat.

Vorabfassung - wird durch die endgültige Fassung ersetzt.

Europäisches Parlament (2017): Bericht über die Untersuchung der Emissionsmessungen in der Automobilindustrie (2016/2215(INI)). Brüssel: Europäisches Parlament. A8-0049/2017.

Eurostat (2017): Top 20 ports – gross weight of goods handled in each port, by direction. 29.06.2017. Eurostat. Luxemburg. http://appsso.eurostat.ec.europa.eu/nui/show.do?dataset=mar_mg_aa_pwhd&lang=en (14.09.2017).

Faber, J., Nelissen, D., Seum, S. (2014): Further technical and operational measures for enhancing the energy efficiency of international shipping. Environmental Aspects. Berlin, Delft, Heidelberg: Öko-Institut, CE Delft, Tim Bäuerle. Discussion Paper. https://www.oeko.de/oekodoc/2107/2014-664-en.pdf (26.07.2017).

Fagnant, D. J., Kockelman, K. M. (2014): The travel and environmental implications of shared autonomous vehicles, using agent-based model scenarios. Transportation Research, Part C: Emerging Technologies 40, S. 1–13.

Fairley, P. (2011): Will Electric Vehicles Finally Succeed? Technology Review 114 (1), S. 58–63.

Fernández, D. D., Pröhl, M., De Troyer, T., Werner, M., Runacres, M. C. (2015): Design of a hydroformed metal blade for vertical-axis wind turbines. Journal of Renewable and Sustainable Energy 7 (4), Art. 043135. http://aip.scitation.org/doi/abs/10.1063/1.4928949 (14.09.2017).

First Solar (2017): Sustainability Report 2017. Tempe, AZ: First Solar. http://www.firstsolar.com/en-EMEA/-/media/First-Solar/Sustainability-Documents/FirstSolar_SustainabilityReport.ashx (14.09.2017).

Flachsland, C., Brunner, S., Edenhofer, O., Creutzig, F. (2011): Climate Policies for Road Transport Revisited (II): Closing the Policy Gap with Cap-and-Trade. Energy Policy 39 (4), S. 2100–2110.

Fleiter, T., Schlomann, B., Eichhammer, W. (Hrsg.) (2013): Energieverbrauch und CO_2-Emissionen industrieller Prozesse – Einsparpotenziale, Hemmnisse und Instrumente. Stuttgart: Fraunhofer Verlag. ISI-Schriftenreihe „Innovationspotenziale".

Foljanty, L., Duong, T. C. (2016): Autonomes Fahren – Chancen, Herausforderungen und Handlungsfelder für öffentliche Akteure. Internationales Verkehrswesen 68 (2), S. 46–48.

Fox, J., Axsen, J., Jaccard, M. (2017): Picking Winners: Modelling the Costs of Technology-specific Climate Policy in the U.S. Passenger Vehicle Sector. Ecological Economics 137, S. 133–147.

Fraedrich, E., Beiker, S., Lenz, B. (2015): Transition pathways to fully automated driving and its implications for the sociotechnical system of automobility. European Journal of Futures Research 3 (1), Art. 11.

Fraunhofer ISE (Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme) (2017a): Entwicklung eines industrietauglichen Recycling-Prozesses für PV-Module. Freiburg: Fraunhofer ISE. https://www.ise.fraunhofer.de/de/forschungsprojekte/pv-recycling.html (14.09.2017).

Fraunhofer ISE (2017b): Photovoltaics Report. Freiburg: Fraunhofer ISE. https://www.ise.fraunhofer.de/content/dam/ise/de/documents/publications/studies/Photovoltaics-Report.pdf (14.09.2017).

Fraunhofer IWES (Fraunhofer Institut für Windenergie und Energiesystemtechnik) (2015): The European Power System in 2030: Flexibility Challenges and Integration Benefits. An Analysis with a Focus on the Pentalateral Energy Forum Region. Analysis on behalf of Agora Energiewende. Berlin: Agora Energiewende. Analysis.

Fraunhofer IWES, Fraunhofer IBP (Fraunhofer-Institut für Bauphysik) (2017): Wärmewende 2030. Schlüsseltechnologien zur Erreichung der mittel- und langfristigen Klimaschutzziele im Gebäudesektor. Berlin: Agora Energiewende.

Friedrich, B. (2015): Verkehrliche Wirkung autonomer Fahrzeuge. In: Maurer, M., Gerdes, J. C., Lenz, B., Winner, H. (Hrsg.): Autonomes Fahren: Technische, rechtliche und gesellschaftliche Aspekte. Berlin, Heidelberg: Springer, S. 331–350.

Friedrich, H. E., Krishnamoorthy, S. K. (2017): Leichtbau als Treiber von Innovationen. In: Friedrich, H. E. (Hrsg.): Leichtbau in der Fahrzeugtechnik. 2. Aufl. Wiesbaden: Springer Vieweg, S. 1–31.

Friedrich, M., Hartl, M. (2016): MEGAFON. Modellergebnisse geteilter autonomer Fahrzeugflotten des öffentlichen Nahverkehrs. Schlussbericht. Stuttgart: Universität Stuttgart, Institut für Straßen- und Verkehrswesen, Lehrstuhl Verkehrsplanung und Verkehrsleittechnik.

Vorabfassung - wird durch die endgültige Fassung ersetzt.

Frieske, B., Klötzke, M., Kreyenberg, D., Bienge, K., Hillebrand, P., Hüging, H., Koska, T., Monscheidt, J., Ritthoff, M., Soukup, O., Tenbergen, J. (2014): Begleitforschung zu Technologien, Perspektiven und Ökobilanzen der Elektromobilität. (STROMbegleitung) im Rahmen der Förderung des Themenfeldes „Schlüsseltechnologien für die Elektromobilität (STROM)". Abschlussbericht des Verbundvorhabens an das Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF). Stuttgart, Wuppertal: Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt, Wuppertal Institut für Klima, Umwelt, Energie. http://www.dlr.de/dlr/Portaldata/1/Resources/documents/2015/DLR_Stuttgart_STROMbegleitung_Abschlussbericht.pdf (21.07.2017).

Frondel, M., Grösche, P., Huchtemann, D., Oberheitmann, A., Peters, J., Vance, C., Angerer, G., Sartorius, C., Bucholz, P., Röhling, S., Wagner, M. (2006): Trends der Angebots- und Nachfragesituation bei mineralischen Rohstoffen. Endbericht. Hannover, Karlsruhe, Essen: Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe, Fraunhofer-Institut für System- und Innovationsforschung ISI, Rheinisch-Westfälisches Institut für Wirtschaftsforschung https://www.bgr.bund.de/DE/Themen/Min_rohstoffe/Downloads/angebots-nachfragesituation-mineral-rohstoffe-endber2006.pdf?__blob=publicationFile&v=2 (10.07.2017).

Frontier Economics, BET (Büro für Energiewirtschaft und technische Planung) (2016): Kosten und Nutzen einer Dynamisierung von Strompreiskomponenten als Mittel zur Flexibilisierung der Nachfrage. Bericht für das Bundesministerium für Wirtschaft und Energie. London, Aachen: Frontier Economics, BET. http://www.bmwi.de/Redaktion/DE/Publikationen/Studien/kosten-nutzen-dynamisierung-strompreiskomponenten.pdf?__blob=publicationFile&v=4 (11.10.2017).

Fulton, L. M., Jacob, Meroux, D. (2017): Three Revolutions in Urban Transportation. Davis, Calif: Institute of Transportation Studies, University of California. https://steps.ucdavis.edu/wp-content/uploads/2017/05/Fulton_3RUCD-ITDP-3R-Report-FINAL_Fulton12.pdf (26.07.2017).

Gabriel, K. M., Endlicher, W. (2011): Urban and rural mortality rates during heat waves in Berlin and Brandenburg, Germany. Environmental Pollution 159 (8–9), S. 2044–2050.

Gährs, S., Hirschl, B., Aretz, A. (2016): Möglichkeiten zur Umgestaltung der EEG-Umlagebasis. Kurzstudie. Berlin: Institut für ökologische Wirtschaftsforschung http://www.bne-online.de/de/system/files/files/attachment/Kurzstudie-EEG-Umlage_I%C3%96W_20161007.pdf (08.09.2017).

Gandenberger, C., Hermann, A., Rüttinger, L., Scholl, C. (2017): Entwicklung von Politikempfehlungen für die Weiterentwicklung und Ausgestaltung von strategischen Ansätzen einer nachhaltigen und effizienten Rohstoffgewinnung und -nutzung. Dessau-Roßlau: Umweltbundesamt. UBA-Texte 98/2017. https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/1410/publikationen/2017-11-03_texte_98-2017_rohpolress.pdf (09.11.2017).

García-Herrera, R., Díaz, J., Trigo, R. M., Luterbacher, J., Fischer, E. M. (2010): A Review of the European Summer Heat Wave of 2003. Critical Reviews in Environmental Science and Technology 40 (4), S. 267–306.

Gastel, M. (2016): Junge Menschen verzichten immer häufiger auf den Führerschein. Berlin: Gastel. http://www.matthias-gastel.de/wp-content/uploads/2016/09/Entwicklung_F%C3%BChrerscheinerteilungen-Baden-W%C3%BCrttemberg-mit-Tabellen.pdf (20.07.2017).

Gather, M., Kagermeier, A., Lanzendorf, M. (2008): Geographische Mobilitäts- und Verkehrsforschung. Berlin, Stuttgart: Borntraeger Verlagsbuchhandlung.

Gawel, E., Purkus, A. (2015): Die Rolle von Energie- und Strombesteuerung im Kontext der Energiewende. Zeitschrift für Energiewirtschaft 39 (2), S. 77–103.

Geels, F. W. (2012): A socio-technical analysis of low-carbon transitions: introducing the multi-level perspective into transport studies. Journal of Transport Geography 24, S. 471–482.

Geels, F. W. (2005): Processes and patterns in transitions and system innovations. Refining the co-evolutionary multi-level perspective. Technological Forecasting and Social Change 72 (6), S. 681–696.

Geels, F. W. (2002): Technological transitions as evolutionary reconfiguration processes. A multi-level perspective and a case-study. Research Policy 31 (8–9), S. 1257–1274.

Gerhardt, N., Böttger, D., Trost, T., Scholz, A., Pape, C., Gerlach, A.-K., Härtel, P., Ganal, I. (2017): Analyse eines europäischen -95%-Klimazielszenarios über mehrere

Vorabfassung - wird durch die endgültige Fassung ersetzt.

Wetterjahre. Teilbericht. Kassel: Fraunhofer-Institut für Windenergie und Energiesystemtechnik IWES.

Gerhardt, N., Sandau, F., Scholz, A., Hahn, H., Schumacher, P., Sager, C., Bergk, F., Kämper, C., Knörr, W., Kräck, J., Lambrecht, U., Antoni, O., Hilpert, J., Merke, K., Müller, T. (2015): Interaktion EE-Strom, Wärme, Verkehr. Endbericht. Kassel, Heidelberg, Würzburg: Fraunhofer-Institut für Windenergie und Energiesystemtechnik IWES, Fraunhofer-Institut für Bauphysik IBP, IFEU – Institut für Energie- und Umweltforschung, Stiftung Umweltenergierecht.

Giesel, F., Nobis, C. (2016): The Impact of Carsharing on Car Ownership in German Cities. Transportation Research Procedia 19, S. 215–224.

Gillingham, K. (2013): The Economics of Fuel Economy Standards versus Feebates. New Haven: National Energy Policy Institute. NEPI Working Paper.

Gillingham, K., Rapson, D., Wagner, G. (2016): The Rebound Effect and Energy Efficiency Policy. Review of Environmental Economics and Policy 10 (1), S. 68–88.

Goodwin, P. (1996): Empirical Evidence on Induced Traffic. Transportation 23 (1), S. 35–54.

Gottschalk, C., Fleischer, J., Gräfe, L., Sobottka, A., Oppermann, H., Benkwitz, F. (2011): Belastung einzuschulender Kinder mit Umweltschadstoffen – Ergebnisse der Schulanfägerstudie Sachsen-Anhalt. UMID: Umwelt und Mensch – Informationsdienst 2011 (2), S. 63–69.

Götz, K. (2017): Was ist anders bei der Jugend? Vortrag, UBA Forum mobil & nachhaltig 31.03.2017, Berlin.

Graaf, L., Jakob, K. (2016): Klimaschutz- und Ressourcenpolitik. Anaysle der Anknüpfungspunkte für die strategische Weiterentwicklung der Ressourcenpolitik. Berlin, Dessau-Roßlau: Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit, Umweltbundesamt. PolRess 2 – Policy Papier. http://edocs.fu-berlin.de/docs/servlets/MCRFileNodeServlet/FUDOCS_derivate_000000008101/GraafxJacobx2016_AnknxpfungspunktexRessourcenpolitikxundxKlimaschutz_PolicyxPapier.pdf;jsessionid=E28CCFF5166252E8497D451FAE4B229E?hosts= (10.07.2017).

Graedel, T. E. (2011): On the Future Availability of the energy Metals. Annual Review of Materials Research 41, S. 323–335.

Grassl, H., Brockhagen, D. (2007): Climate forcing of aviation emissions in high altitudes and comparison of metrics. An update according to the Fourth Assessment Report, IPCC 2007. Berlin: Germanwatch. https://germanwatch.org/kliko/k57flug.htm (19.07.2017).

Gratza, H. (2016): Deutschland-Takt aus Sicht des Bundes. Vortrag, 34. Horber Schienen-Tage, 17.11.2016, Horb.

Greene, D. L., Park, S., Liu, C. (2013): Analyzing the Transition to Electric Drive in California. Final Report to the International Council on Clean Transportation. Knoxville: University of Tennessee, Howard H. Baker Jr. Center for Public Policy. White Paper 4.13.

Greening, L. A., Greene, D. L., Difiglio, C. (2000): Energy efficiency and consumption – the rebound effect – a survey. Energy Policy 28 (6–7), S. 389–401.

Greenpeace (2015): Klimaschutz: Der Plan. Energiekonzept für Deutschland. Hamburg: Greenpeace.

Grewe, H. A., Heckenhahn, S., Blättner, B. (2014): Gesundheitsschutz bei Hitzewellen. Zeitschrift für Gerontologie und Geriatrie 47 (6), S. 483–489.

Groke, M., Kaerger, W., Sander, K., Bergamos, M. (2017): Optimierung der Separation von Bauteilen und Materialien aus Altfahrzeugen zur Rückgewinnung kritischer Metalle (ORKAM). Dessau-Roßlau: Umweltbundesamt. UBA-Texte 02/2017. http://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/1/publikationen/2017-01-11_texte_02-2017_orkam_endbericht.pdf (24.07.2017).

The Guardian (10.04.2017): Tesla surpasses GM to become most valuable car company in US. https://www.theguardian.com/technology/2017/apr/10/tesla-most-valuable-car-company-gm-stock-price (21.07.2017).

Gude, M., Just, G., Kaufhold, J., Müller, M., Stegelmann, M., Meschut, G., Gerkens, M., Zäh, M. F., Hofmann, D., Greitemann, J., Kamps, T., Stock, J., Lieberwirth, H., Krampitz, T. (2015): FOREL Studie. Chancen und Herausforderungen im ressourceneffizienzten Leichtbau für die Elektromobilität. Dresden, Freiberg, Paderborn, München: TU Dresden, TU Bergakademie Freiberg, Universität Paderborn, TU München. http://plattform-forel.de/wp-content/uploads/2015/05/FOREL-Studie.pdf (24.07.2017).

Vorabfassung - wird durch die endgültige Fassung ersetzt.

Günnewig, D., Balla, S., Rohr, A., Hochgürtel, D., Steigner, W., Bühringer, C., Schulz-Bernholt, S., Schneider, C., Bänder, A. (2016): Strategische Umweltprüfung zum Bundesverkehrswegeplan 2030. Umweltbericht. Stand: März 2016. Hannover, Gunzenhausen, Langenhagen: Bosch & Partner, Baader Konzept, Gruppe Freiraumplanung. https://www.bmvi.de/SharedDocs/DE/Anlage/VerkehrUndMobilitaet/BVWP/bvwp-2030-umweltbericht.pdf?__blob=publicationFile (18.07.2017).

Hagelüken, C. (2011): Rohstoffsicherung durch Recycling – Chancen, Herausforderungen & Grenzen. Vortrag, Deutscher Rohstoffeffizienz-Preis 2011. Rohstoffe erfolgreich für die Zukunft sichern – effizient Material und Rohstoffe nutzen, 30.11.2011, Berlin.

Harmsen, J. H. M., Roes, A. L., Patel, M. K. (2013): The impact of copper scarcity on the efficiency of 2050 global renewable energy scenarios. Energy 50, S. 62–73.

Hattermann, F. F., Huang, S., Burghoff, O., Hoffmann, P., Kundzewicz, Z. W. (2016): Brief Communication: An update of the article „Modelling flood damages under climate change conditions – a case study for Germany". National Hazards Earth System Science 16 (7), S. 1617–1622.

Haucap, J., Pavel, F., Aigner, R., Arnold, M., Hottenrott, M., Kehder, C. (2015): Chancen der Digitalisierung auf Märkten für urbane Mobilität: Das Beispiel Uber. Düsseldorf: Düsseldorf University Press. Ordnungspolitische Perspektiven 73.

Hayumbu, P., Robins, T. G., Key-Schwartz, R. (2008): Cross-Sectional Silica Exposure Measurements at Two Zambian Copper Mines of Nkana and Mufulira. International Journal of Environmental Research and Public Health 5 (2), S. 86–90.

Hazan, J., Lang, N., Ulrich, P., Chua, J., Doubara, X., Steffens, T. (2016): Will Autonomous Vehicles Derail Trains? Boston, Mass.: The Boston Consulting Group.

Hedemann, J., Meinshausen, I., Ortlepp, R., Schiller, G., Liebich, A., Möller, A. (2017): Kartierung des anthropogenen Lagers in Deutschland – Entwicklung eines dynamischen Stoffstrommodells und Aufbau einer Datenbank zur Prognose des Sekundärrohstoffaufkommens (KartAL II). Dessau-Roßlau: Umweltbundesamt. UBA-Texte 58/2017. https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/1410/publikationen/2017-08-04_texte_58-2017_kartalii.pdf (11.09.2017).

Heidt, C., Lambrecht, U., Hardinghaus, M., Knitschky, G., Schmidt, P., Weindorf, W., Naumann, K., Majer, S., Müller-Langer, F., Seiffert, M. (2013): CNG und LPG – Potenziale dieser Energieträger auf dem Weg zu einer nachhaltigeren Energieversorgung des Straßenverkehrs. Kurzstudie im Rahmen der Wissenschaftlichen Begleitung, Unterstützung und Beratung des BMVBS in den Bereichen Verkehr und Mobilität mit besonderem Fokus auf Kraftstoffen und Antriebstechnologien sowie Energie und Klima. Heidelberg, Berlin, Ottobrunn, Leipzig: Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt, IFEU – Institut für Energie- und Umweltforschung, Ludwig-Bölkow-Systemtechnik, Deutsches Biomasseforschungszentrum. http://www.bmvi.de/SharedDocs/DE/Anlage/MKS/mks-kurzstudie-cng-lpg.pdf?__blob=publicationFile (02.08.2017).

Heindl, P., Löschel, A. (2015): Social Implications of Green Growth Policies from the Perspective of Energy Sector Reform and its Impact on Households. Mannheim: Zentrum für Europäische Wirtschaftsforschung. ZEW Discussion Paper 15-012. http://ftp.zew.de/pub/zew-docs/dp/dp15012.pdf (11.01.2016).

Heinze, C., Fehling, M., Fiedler, L. (Hrsg.) (2014): Personenbeförderungsgesetz : PBefG. Kommentar. 2. Aufl. München: Beck.

Helms, H., Jöhrens, J., Kämper, C., Giegrich, J., Liebich, A., Vogt, R., Lambrecht, U. (2016): Weiterentwicklung und vertiefte Analyse der Umweltbilanz von Elektrofahrzeugen. Dessau-Roßlau: Umweltbundesamt. UBA-Texte 27/2016. https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/378/publikationen/texte_27_2016_umweltbilanz_von_elektrofahrzeugen.pdf (21.07.2017).

Helms, H., Kräck, J., Heidt, C., Lambrecht, U., Knörr, W. (2015): Entwicklung der Energiesteuereinnahmen im Kraftstoffsektor. Endbericht. Heidelberg: IFEU – Institut für Energie und Umweltforschung. http://www.derenergieblog.de/wp-content/uploads/258-Abschlussbericht-Energiesteuereinnahmen-im-Kraftstoffsektor-ifeu-....pdf (14.09.2017).

Henning, H.-M., Palzer, A. (2015): Was kostet die Energiewende? Wege zur Transformation des deutschen Energiesystems bis 2050. Freiburg: Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme ISE.

Hermann, H., Cludius, J., Förster, H., Matthes, F. C., Schumacher, K., Buchholz, G., Behnisch, M., Berman, J., Duscha, V., Marth, H. (2014): Ausweitung des Emissions-

Vorabfassung - wird durch die endgültige Fassung ersetzt.

handels auf Kleinemittenten im Gebäude- und Verkehrssektor. Gestaltung und Konzepte für einen Policy mix. Endbericht zu Arbeitspaket 1 und Arbeitspaket 2 des UFOPLAN-Vorhabens „Ausweitung des Emissionshandels auf neue Sektoren und Kleinemittenten (z.B. Gebäudebereich)“. Dessau-Roßlau: Umweltbundesamt. Climate Change 03/2014. https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/378/publikationen/climate_change_03_2014_komplett_27.3.14.pdf (04.08.2017).

Hertwich, E. G., Gibon, T., Bouman, E. A., Arvesen, A., Suh, S., Heath, G. A., Bergesen, J. D., Ramirez, A., Vega, M. I., Shi, L. (2015): Integrated life-cycle assessment of electricity-supply scenarios confirms global environmental benefit of low carbon technologies. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America 112 (20), S. 6277–6282.

Hill, N., Finnegan, S., Norris, J., Brannigan, C., Wynn, D., Baker, H., Skinner, I. (2011): Reduction and Testing of Greenhouse Gas (GHG) Emissions from Heavy Duty Vehicles. Lot 1: Strategy. Final Report. Didcot: AEA Energy & Environment. AEA/ ED46904/Final Report 4.

Hoegh-Guldberg, O., Bruno, J. F. (2010): The Impact of Climate Change on the World's Marine Ecosystems. Science 328 (5985), S. 1523–1528.

Hoek, G., Krishnan, R. M., Beelen, R., Peters, A., Ostro, B., Brunekreef, B., Kaufman, J. D. (2013): Long-term air pollution exposure and cardio-respiratory mortality: a review. Environmental Health 12 (1), S. 43.

Höft, U. (2016): Mehr Güter auf die Schiene! Aber wie? Ansätze und Vorschläge zur Attraktivitätssteigerung des Schienengüterverkehrs in Deutschland und in Europa. Gutachten für die Fraktion Bündnis 90/Die Grünen im Deutschen Bundestag. Brandenburg an der Havel: Bahn Media Institut für Management, Qualität und Verkehrsmittelreinigung, Technische Hochschule Brandenburg, Fachgebiet Marketing/Innovation.

Holzhey, M. (2010): Schienennetz 2025/2030. Ausbaukonzeption für einen leistungsfähigen Schienengüterverkehr in Deutschland. Dessau-Roßlau: Umweltbundesamt. UBA-Texte 42/10.

Hornberg, C., Claßen, T., Steckling, N., Samson, R., McCall, T., Tobollik, M., Mekel, O. C. L., Terschüren, C., Schillmöller, Z., Popp, J., Paetzelt, G., Schümann, M. (2013): Quantifizierung der Auswirkungen verschiedener Umweltbelastungen auf die Gesundheit der Menschen in Deutschland unter Berücksichtigung der bevölkerungsbezogenen Expositionsermittlung (Verteilungsbasierte Analyse gesundheitlicher Auswirkungen von Umwelt-Stressoren, VegAS). Dessau-Roßlau: Umweltbundesamt. Schriftenreihe Umwelt & Gesundheit 01/2013.

Hornberg, C., Pauli, A. (Hrsg.) (2009): Umweltgerechtigkeit – die soziale Verteilung von gesundheitsrelevanten Umweltbelastungen (Dokumentation der Fachtagung vom 27. bis 28. Oktober 2008 in Berlin). Bielefeld: Universität Bielefeld.

Huisman, J., Habib, H., Brechu, M. G., Downes, S., Leroy, P., Herreras-Martínez, L., Løvik, A. N., Wäger, P., Cassard, D., Tertre, F., Mählitz, P., Rotter, V. S., Chancerel, P., Söderman, M. L. (2016): ProSUM Harmonisation paper for external for external feedback and consultation. o.O.: ProSUM. http://www.prosumproject.eu/sites/default/files/ProSUM%20Harmonization%20paper_v3_2016%2010%2012_Final.pdf (11.09.2017).

Hülsmann, F., Mottschall, M., Hacker, F., Kasten, P. (2014): Konventionelle und alternative Fahrzeugtechnologien bei Pkw und schweren Nutzfahrzeugen – Potenziale zur Minderung des Energieverbrauchs bis 2050. Freiburg: Öko-Institut. Öko-Institut Working Paper 3/2014

Hussain, O., Ghiasi, A., Li, X., Qian, Z. (2016): Freeway Lane Management Approach in Mixed Traffic Environment with Connected Autonomous Vehicles. https://arxiv.org/pdf/1609.02946 (25.07.2017).

ICCT (International Council on Clean Transportation) (2017a): Certification of CO_2-emissions and fuel consumption of on-road heavy-duty vehicles in the European Union. Washington, DC: ICCT. Policy Update. http://www.theicct.org/sites/default/files/publications/ICCT_update_HDV-EU-CO2-cert_20170731.pdf (09.10.2017).

ICCT (2017b): A roadmap for heavy-duty engine CO_2 standards within the European Union framework. Washington, DC: ICCT. Briefing. http://theicct.org/sites/default/files/publications/EU-HDV-CO2-engine-stds_ICCT-Briefing_04092017_vF.pdf (09.10.2017).

ICMM (International Council on Mining & Metals) (2014): Engaging with society. Annual Review 2014. London: ICMM. https://www.icmm.com/website/publications/pdfs/annual-review/2014_icmm_annual-review (12.09.2017).

Vorabfassung - wird durch die endgültige Fassung ersetzt.

ICMM (2012): The role of minerals and metals in a low carbon economy. Mining's contribution to sustainable development. London: ICMM. http://www.icmm.com/website/publications/pdfs/3739.pdf (12.09.2017).

IFEU (Institut für Energie- und Umweltforschung) (2016): Aktualisierung „Daten- und Rechenmodell: Energieverbrauch und Schadstoffemissionen des motorisierten Verkehrs in Deutschland 1960–2035" (TREMOD 5.6) für die Emissionsberichterstattung 2016 (Berichtsperiode 1990–2014). Anhang. Heidelberg: IFEU.

ifmo (Institut für Mobilitätsforschung) (2013): Mobility Y – The emerging travel patterns of generation Y. München: ifmo. https://www.ifmo.de/files/publications_content/2013/ifmo_2013_Mobility_Y_en.pdf (26.07.2017).

IMO (International Maritime Organization) (2017): Marine Environment Protection Committee (MEPC), 71st session, 3–7 July 2017. London: IMO. http://www.imo.org/en/MediaCentre/MeetingSummaries/MEPC/Pages/MEPC-71.aspx (09.10.2017).

IMO (2015): Third IMO GHG Study 2014. Executive Summary and Final Report. London: IMO. http://pass-through.fw-notify.net/download/613742/http://www.imo.org/en/OurWork/Environment/PollutionPrevention/AirPollution/Documents/Third%20Greenhouse%20Gas%20Study/GHG3%20Executive%20Summary%20and%20Report.pdf (20.07.2017).

infas (Institut für angewandte Sozialwissenschaft), DLR (Deutsches Institut für Luft- und Raumfahrt) (2010): Mobilität in Deutschland 2008. Ergebnisbericht. Struktur – Aufkommen – Emissionen – Trends. Bonn, Berlin: infas, DLR.

ING Economics Department (2017): Breakthrough of electric vehicle threatens European car industry. Amsterdam: ING Economics Department. https://www.ingwb.com/media/1994284/ing-breakthrough-of-electric-vehicle-threatens-european-car-industry.pdf (01.08.2017).

International Working Group on Data Protection in Telecommunications (2009): Report and Guidance on Road Pricing - „Sofia Memorandum" – 45th meeting, 12–13 March 2009, Sofia (Bulgaria). 12.–13. März 2009, Sofia.

Intraplan Consult, BVU (Beratergruppe Verkehr + Umwelt) (2007): Prognose der deutschlandweiten Verkehrsverflechtungen 2025. München, Freiburg: ITP, BVU.

IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change) (2014): Climate Change 2014. Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Part A: Global and Sectoral Aspects. Working Group II Contribution to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. New York, NY: Cambridge University Press.

Isensee, J. (2011): Klimaschutz im Seeverkehr – Schiffe mit geringeren Treibhausgas-Emissionen. In: Lozán, J. L., Grassl, H., Karbe, L., Reise, K. (Hrsg.): Warnsignal Klima: Die Meere – Änderungen & Risiken. Wissenschaftliche Fakten. Hamburg: Wissenschaftliche Auswertungen, S. 353–359.

ITF (International Transport Forum) (2016): Shared Mobility: Innovation for Liveable Cities. Corporate Partnership Board Report. Paris: ITF.

ITF (2015): Shipping and Climate Change: Where are we and which way forward? Paris: ITF. Policy Brief Maritime Transport October 2015. http://www.green-4sea.com/itf-calls-imo-to-impose-carbon-tax-for-shipping/ (26.07.2017).

Jackson, M. D. (2011): Technologies to Improve Fuel Efficiency of Heavy Duty Trucks. Vortrag, Reducing Greenhouse Gas Emissions from Heavy-Duty Vehicles: Policy options, development, and prospects. International Workshop, 10.11.2011, Brüssel.

Jendritzky, G. (2007): Folgen des Klimawandels für die Gesundheit. In: Endlicher, W., Gerstengarbe, F.-W. (Hrsg.): Der Klimawandel. Einblicke, Rückblicke und Ausblicke. Potsdam: Potsdam-Institut für Klimafolgenforschung, S. 108–118.

Jöhrens, J., Helms, H. (2013): Konzept zur zukünftigen Beurteilung der Effizienz von Kraftfahrzeugen. Dessau-Roßlau: Umweltbundesamt. UBA-Texte 95/2013. https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/378/publikationen/texte_95_2013_konzept_zur_zukuenftigen_beurteilung_der_effizienz_von_kraftfahrzeugen.pdf (17.07.2017).

Jung, C. (2017): Der rechtliche (Kompetenz-)Rahmen der Verkehrswende. Vortrag, Letzte Ausfahrt Dekarbonisierung: 25. BBH-Energiekonferenz, 26.06.2017, Berlin.

Vorabfassung - wird durch die endgültige Fassung ersetzt.

Kaiser, O. S., Seitz, H. (2014): Ressourceneffizienz von Windenergieanlagen. Berlin: VDI Zentrum Ressourceneffizienz. Kurzanalyse 9. http://www.ressource-deutschland.de/fileadmin/user_upload/downloads/kurzanalysen/2014-Kurzanalyse-VDI-ZRE-09-Ressourceneffizienz-Windenergieanlagen.pdf (21.07.2017).

Kampman, B., Davidson, M. D., Faber, J. (2008): Emissions Trading and Fuel Efficiency in Road Transport: An Analysis of the Benefits of Combining Instruments. Stockholm: Swedish Environmental Protection Agency. Report 5896.

Karl, A., Mehlert, C., Werner, J. (2017): Reformbedarf PBefG. Rechtsrahmen für Mobilitätsangebote mit flexibler Bedienung unter besonderer Berücksichtigung des Bedarfs in Räumen und für Zeiten mit schwacher Nachfrage. Gutachten für die Bundestagsfraktion Bündnis 90/Die Grünen. Berlin: KCW GmbH.

Karplus, V. J., Paltsev, S., Babiker, M., Reilly, J. M. (2013): Should a Vehicle Fuel Economy Standard Be Combined with an Economy-Wide Greenhouse Gas Emissions Constraint? Implications for Energy and Climate Policy in the United States. Energy Economics 36, S. 322–333.

Kasten, P., Blanck, R., Loreck, C., Hacker, F. (2013): Strombasierte Kraftstoffe im Vergleich – Stand heute und die Langfristperspektive. Aktualisierte Fassung. Freiburg, Darmstadt, Berlin: Öko-Institut. Öko-Institut Working Paper 1/2013.

Kasten, P., Mottschall, M., Köppel, W., Degünther, C., Schmied, M., Wüthrich, P. (2016): Erarbeitung einer fachlichen Strategie zur Energieversorgung des Verkehrs bis zum Jahr 2050. Dessau-Roßlau: Umweltbundesamt. UBA-Texte 72/2016.

Kasten, P., Schumacher, K., Zimmer, W. (2015): Instrumentenmix im Verkehrssektor: Welche Rolle kann der EU-ETS für den Straßenverkehr spielen? Freiburg, Berlin, Darmstadt: Öko-Institut.

KBA (Kraftfahrt-Bundesamt) (2017a): Bestand in den Jahren 1960 bis 2017 nach Fahrzeugklassen. Flensburg: KBA. https://www.kba.de/DE/Statistik/Fahrzeuge/Bestand/FahrzeugklassenAufbauarten/b_fzkl_zeitreihe.html (18.07.2017).

KBA (2017b): Fahrzeugzulassungen (FZ). Neuzulassungen von Kraftfahrzeugen nach Umwelt-Merkmalen Jahr 2016. FZ 14. Flensburg: KBA.

KBA (2017c): Neuzulassungen in den Jahren 1960 bis 2016 nach Fahrzeugklassen. Flensburg: KBA. https://www.kba.de/DE/Statistik/Fahrzeuge/Neuzulassungen/FahrzeugklassenAufbauarten/n_fzkl_zeitreihe.html (18.07.2017).

KBA (2017d): Neuzulassungen. Jahresbilanz der Neuzulassungen 2016. Flensburg: KBA. https://www.kba.de/DE/Statistik/Fahrzeuge/Neuzulassungen/neuzulassungen_node.html (08.09.2017).

Kehe, K., Eyer, P. (2013): Gasförmige Verbindungen. In: Marquardt, H., Schäfer, S. G., Barth, H. (Hrsg.): Lehrbuch der Toxikologie. 3. Aufl. Stuttgart: Wissenschaftliche Verlagsgesellschaft, S. 855–884.

Kickler, K., Franken, G. (2017): Sustainability Schemes for Mineral Resources: A Comparative Overview. Hannover: Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe. https://www.bgr.bund.de/EN/Themen/Min_rohstoffe/Downloads/Sustainability_Schemes_for_Mineral_Resources.pdf?__blob=publicationFile&v=6 (11.09.2017).

Klier, T., Linn, J. (2012): Using Vehicle Taxes to Reduce Carbon Dioxide Emissions Rates of New Passenger Vehicles: Evidence from France, Germany, and Sweden. Chicago: Federal Reserve Bank of Chicago. FRB of Chicago Working Paper 2012-09.

Knorr, K., Zimmermann, B., Kirchner, D., Speckmann, M., Spieckermann, R., Widdel, M., Wunderlich, M., Mackensen, R., Rohrig, K., Steinke, F., Wolfrum, P., Leveringhaus, T., Lager, T., Hofmann, L., Filzek, D., Göbel, T., Kusserow, B., Nicklaus, L., Ritter, P. (2014): Kombikraftwerk 2. Abschlussbericht. Kassel, München, Hannover: Fraunhofer IWES, Siemens AG, Institut für Energieversorgung und Hochspannungstechnik, CUBE Engineering.

Köckler, H., Hornberg, C. (2012): Vulnerabilität als Erklärungsmodelleiner sozial differenzierten Debatte um Risiken und Chancen im Kontext von Umweltgerechtigkeit. In: Bolte, G., Bunge, C., Hornberg, C., Köckler, H., Mielck, A. (Hrsg.): Umweltgerechtigkeit. Chancengleichheit bei Umwelt und Gesundheit: Konzepte, Datenlage und Handlungsperspektiven. Bern: Huber, S. 73–86.

Köhl, M., Plugge, D., Gutsch, M., Lasch-Born, P., Müller, M., Reyer, C. (2017): Wald und Forstwirtschaft. In: Brasseur, G., Jacob, D., Schuck-Zöller, S. (Hrsg.): Klima-

Vorabfassung - wird durch die endgültige Fassung ersetzt.

wandel in Deutschland. Entwicklung, Folgen, Risiken und Perspektiven. Berlin, Heidelberg: Springer, S. 193–201.

Kohlmeyer, R. (2014): Fünfzehn Jahre später. In: Brunn, M. (Hrsg.): RECYCLING Almanach 2015. München: Detail Business Information GmbH, S. 145–149.

Koppe, C., Jendritzky, G., Pfaff, G. (2004): Die Auswirkungen der Hitzewelle 2003 auf die Gesundheit. In: DWD (Deutscher Wetterdienst) (Hrsg.): Klimastatusbericht 2003. Offenbach am Main: DWD, S. 152–162.

Korn, M., Leupold, A., Niederau, A., Schneider, C., Hartwig, K.-H., Scheffler, R. (2014): Berechnung der Wegekosten für das Bundesfernstraßennetz sowie der externen Kosten nach Maßgabe der Richtlinie 1999/62/EG für die Jahre 2013 bis 2017. Endbericht. Weimar, Leipzig, Aachen, Münster: Alfen Consult, AVISO, Institut für Verkehrswissenschaft, Westfälische Wilhelms-Universität Münster. Z20/SEV/288.3/1220/UI23.

Kraft, M., Eikmann, T., Kappos, A., Künzli, N., Rapp, R., Schneider, K., Seitz, H., Voss, J.-U., Wichmann, H. E. (2005): The German view: Effects of nitrogen dioxide on human health – derivation of health-related short-term and long-term values. International Journal of Hygiene and Environmental Health 208 (4), S. 305–318.

Kreyenberg, D., Lischke, A., Bergk, F., Duennebeil, F., Heidt, C., Knörr, W., Raksha, T., Schmidt, P., Weindorf, W., Naumann, K., Majer, S., Müller-Langer, F. (2015): Erneuerbare Energien im Verkehr. Potenziale und Entwicklungsperspektiven verschiedener erneuerbarer Energieträger und Energieverbrauch der Verkehrsträger. Studie im Rahmen der Wissenschaftlichen Begleitung, Unterstützung und Beratung des BMVI in den Bereichen Verkehr und Mobilität mit besonderem Fokus auf Kraftstoffen und Antriebstechnologien sowie Energie und Klima. Berlin, Heidelberg, München/Ottobrunn, Leipzig: Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt, IFEU – Institut für Energie- und Umweltforschung, Ludwig-Bölkow-Systemtechnik, Deutsches Biomasseforschungszentrum.

Kuchinskas, S. (2017): Setting the right price for LiDAR mass adoption. London: TU Automotive. http://analysis.tu-auto.com/auto-mobility/setting-right-price-lidar-mass-adoption (08.09.2017).

Kühlwein, J. (2016a): Driving resistances of light-duty vehicles in Europe: present situation, trends, and scenarios for 2025. Washington, DC: International Council on Clean Transportation Europe. http://www.theicct.org/sites/default/files/publications/ICCT_LDV-Driving-Resistances-EU_121516.pdf (15.06.2017).

Kühlwein, J. (2016b): The impact of official versus real-world road loads on CO_2 emissions and fuel consumption of European passenger cars. Washington, DC: International Council on Clean Transportation Europe. http://www.theicct.org/sites/default/files/publications/ICCT_Coastdowns-EU_201605.pdf (07.07.2017).

Kunz, M., Mohr, S., Werner, P. (2017): Niederschlag. In: Brasseur, G., Jacob, D., Schuck-Zöller, S. (Hrsg.): Klimawandel in Deutschland. Entwicklung, Folgen, Risiken und Perspektiven. Berlin, Heidelberg: Springer, S. 57–66.

Lanctot, R. (2017): Accelerating the Future: The Economic Impact of the Emerging Passenger Economy. Milton Keynes: Strategy Analytics.

LANUV NRW (Landesamt für Natur, Umwelt und Verbraucherschutz Nordrhein-Westfalen) (2010): Gesundheitliche Wirkungen von Feinstaub und Stickstoffdioxid im Zusammenhang mit der Luftreinhalteplanung. Recklinghausen: LANUV NRW.

Larsen, J. (2006): Plan B Updates. Setting the Record Straight: More than 52,000 Europeans Died from Heat in Summer 2003. Stand: 28.07.2006. Washington, DC: Earth Policy Institute. http://www.earth-policy.org/plan_b_updates/2006/update56 (12.07.2017).

Laußmann, D., Haftenberger, M., Lampert, T., Scheidt-Nave, C. (2013): Soziale Ungleichheit von Lärmbelästigung und Straßenverkehrsbelastung. Ergebnisse der Studie zur Gesundheit Erwachsener in Deutschland (DEGS1). Bundesgesundheitsblatt – Gesundheitsforschung – Gesundheitsschutz 56 (5–6), S. 822–831.

Law, K., Jackson, M. D., Chan, M. (2011): European Union Greenhouse Gas Reduction Potential for Heavy-Duty Vehicles. Report. Cupertino, Calif.: TIAX LLC. TIAX Reference D5625.

Lee, D. S., Pitari, G., Grewe, V., Gierens, K., Penner, J. E., Petzold, A., Prather, M. J., Schumann, U., Bais, A., Berntsen, T., Iachetti, D., Lim, L. L., Sausen, R. (2010): Transport impacts on atmosphere and climate: Aviation. Atmospheric Environment 44 (37), S. 4678–4734.

Lenz, B., Fraedrich, E. (2015): Neue Mobilitätskonzepte und autonomes Fahren: Potenziale der Veränderung. In:

Vorabfassung - wird durch die endgültige Fassung ersetzt.

Maurer, M., Gerdes, J. C., Lenz, B., Winner, H. (Hrsg.): Autonomes Fahren: Technische, rechtliche und gesellschaftliche Aspekte. Berlin, Heidelberg: Springer, S. 175–195.

Lieberwirth, H., Krampitz, T. (2015): Entwicklungstendenzen für den Einsatz von Leichtbauwerkstoffen im Fahrzeugbau und Auswirkungen auf das Recycling. In: Thomé-Kozmiensky, K. J., Goldmann, D. (Hrsg.): Recycling und Rohstoffe. Bd. 8. Berlin: TK Verlag Karl J. Thomé-Kozmiensky, S. 207–2018.

Lieberwirth, H., Krampitz, T., Stegelmann, M. (2016): Fahrzeuge und Batterien. Recycling als Bestandteil des Life Cycle Assessment der Fahrzeugindustrie. In: Thomé-Kozmiensky, K. J., Goldmann, D. (Hrsg.): Recycling und Rohstoffe. Bd. 9. Berlin: TK Verlag Karl J. Thomé-Kozmiensky, S. 295–308.

Liebreich, M. (2017): State of the Industry Keynote at BNEF Global Summit 2017. Vortrag, Bloomberg New Energy Finance Summit, 25.04.2017, New York.

Liu, W., Xie, S.-P., Liu, Z., Zhu, J. (2017): Overlooked possibility of a collapsed Atlantic Meridional Overturning Circulation in warming climate. Science Advances 3 (1), e1601666. http://advances.sciencemag.org/content/3/1/e1601666 (10.04.2017).

Lobig, A., Liedtke, G., Lischke, A., Wolfermann, A., Knörr, W. (2016): Verkehrsverlagerungspotenzial auf den Schienengüterverkehr in Deutschland. Endbericht im Rahmen der Wissenschaftlichen Begleitung, Unterstützung und Beratung des BMVI in den Bereichen Verkehr und Mobilität mit besonderem Fokus auf Kraftstoffen und Antriebstechnologien sowie Energie und Klima. Berlin, Heidelberg, München/Ottobrunn, Leipzig: Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt, IFEU – Institut für Energie- und Umweltforschung, Ludwig-Bölkow-Systemtechnik, Deutsches Biomasseforschungszentrum.

Loisel, R., Pasaoglu, G., Thiel, C. (2014): Large-Scale Deployment of Electric Vehicles in Germany by 2030: An Analysis of Grid-to-Vehicle and Vehicle-to-Grid Concepts. Energy Policy 65, S. 432–443.

Lutsey, N. (2017): Integrating electric vehicles within U.S. and European efficiency regulations. Washington, DC: International Council on Clean Transportation. Working Paper 2017-07. http://www.theicct.org/sites/default/files/publications/Integrating-EVs-US-EU_ICCT_Working-Paper_22062017_vF.pdf (09.10.2017).

Lutter, S., Burrell, L., Giljum, S., Patz, T., Kerneger, L., Rodrigo, A. (2013): Kein Land in Sicht. Wie viel Land benötigt Europa weltweit zur Deckung seines hohen Konsums. Wien: GLOBAL 2000, Sustainable Europe Research Institut, Friends of the Earth Europe.

Madlener, R., Alcott, B. (2009): Energy Rebound and Economic Growth: A Review of the Main Issues and Research Needs. Energy 34 (3), S. 370–376.

Mahler, A., Runkel, M., Ludewig, D., Klusmann, B., Zerzawy, F. (2017): Die Finanzierung Deutschlands über Steuern auf Arbeit, Kapital und Umweltverschmutzung. Berlin: Forum Ökologisch-Soziale Marktwirtschaft. FÖS-Hintergrundpapier 06/2017. www.foes.de/pdf/2017-06-Hintergrundpapier-Steuerstruktur.pdf (04.08.2017).

Mander, S. (2017): Slow steaming and a new dawn for wind propulsion: A multi-level analysis of two low carbon shipping transitions. Marine Policy 75, S. 210–216.

Manhart, A., Gandenberger, C., Bodenheimer, M., Rüttinger, L., Griestop, L. (2015): Ungewollte Verschiebungseffekte durch Standards und Zertifizierung. Relevanz und Lösungsansätze für den Bereich der abiotischen Rohstoffe. Dessau-Roßlau: Umweltbundesamt. RohPolRess-Kurzanalyse 5. https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/378/dokumente/rohpolress_kurzanalyse_5_verschiebungseffekte_07102015_final-ig.pdf (10.07.2017).

Marchetti, C. (1994): Anthropological invariants in travel behavior. Technological Forecasting and Social Change 47 (1), S. 75–88.

Marscheider-Weidemann, F., Langkau, S., Hummen, T., Erdmann, L., Espinoza, L. T., Angerer, G., Marwede, M., Benecke, S. (2016): Rohstoffe für Zukunftstechnologien 2016. Auftragsstudie. Berlin: Deutsche Rohstoffagentur in der Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe. DERA Rohstoffinformationen 28.

Matschoss, P., Töpfer, K. (2015): Der EEG-Fonds. Ein ergänzender Finanzierungsmechanismus für erneuerbare Energien und Vorbild zukünftiger Infrastrukturfinanzierung? Potsdam: Institute for Advanced Sustainability Studies. http://www.iass-potsdam.de/sites/default/files/files/matschoss_der_eeg-fonds.pdf (08.09.2017).

Matthes, F. C. (2017): Sind komplementäre Maßnahmen zum EU ETS wirklich nur Nullsummenspiele? Vortrag, Workshop des Öko-Instituts auf den Berliner Energie-

Vorabfassung - wird durch die endgültige Fassung ersetzt.

tagen 2017 „Neues vom Emissionshandel“, 05.05.2017, Berlin.

Matthes, F. C., Busche, J., Döring, U., Emele, L., Gores, S., Harthan, R. O., Hermann, H., Jörß, W., Loreck, C., Scheffler, M., Hansen, P., Diekmann, J., Horn, M., Eichhammer, W., Elsland, R., Fleiter, T., Schade, W., Schlomann, B., Sensfuß, F., Ziesing, H.-J. (Hrsg.) (2013): Politikszenarien für den Klimaschutz VI. Treibhausgas-Emissionsszenarien bis zum Jahr 2030. Dessau-Roßlau: Umweltbundesamt. Climate Change 04/2013.

Matthias, V. (2017): Schiff ahoi – saubere Luft ade? Wie Schiffsemissionen unsere Luftqualität beeinflussen. Vortrag, DBU Sommerakademie 2017, 12.09.2017, Volkenroda.

Mayer, A. C. R. (2016): Emissionsstabilität von Fahrzeugmotoren. Beitrag zur Sachverständigenanhörung des 5. PUA. Berlin: Deutscher Bundestag. Ausschussdrucksache 18(31)38.

McKinsey & Company (2017): Electrifying insights: How automakers can drive electrified vehicle sales and profitability. New York, NY: McKinsey & Company.

Melton, N., Axsen, J., Sperling, D. (2016): Moving beyond alternative fuel hype to decarbonize transportation. Nature Energy 1, Art. 16013. http://dx.doi.org/10.1038/nenergy.2016.13 (11.09.2017).

Mengel, M., Levermann, A., Frieler, K., Robinson, A., Marzeion, B., Winkelmann, R. (2016): Future sea-level rise constrained by observations and long-term commitment. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America 113 (10), S. 2597–2602.

Meszler, D., German, J., Mock, P., Bandivadekar, A. (2016): CO_2 Reduction Technologies for the European Car and Van Fleet, a 2025–2030 Assessment. Methodology and Summary of Compliance Costs for Potential EU CO_2 Standards. Washington, DC: International Council on Clean Transportation Europe. http://www.theicct.org/sites/default/files/publications/EU-Cost-Curves_ICCT_nov2016.pdf (17.07.2017).

Metz, D. (2008): The Myth of Travel Time Saving. Transport Reviews 28 (3), S. 321–336.

Michaelis, J., Helms, H., Noeren, D., Dallmer-Zerbe, K., Gnann, T., Haendel, M., Reinhard, C., Marwitz, S. (2015): Elektromobilität in Baden-Württemberg im Jahr 2030. Projektübergreifende Forschung im Schaufenster Elektromobilität Baden-Württemberg. Abschlussbericht. Heidelberg, Karlsruhe, Freiburg: Institut für Energie und Umweltforschung, Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme ISE, Fraunhofer-Institut für System- und Innovationsforschung ISI. http://www.e-mobilbw.de/files/e-mobil/content/DE/Publikationen/PDF%20Schaufenster%20Projekte/10_Studien_Begleitforschung/4_Energie_und_Umwelt.pdf (21.07.2017).

Mielck, A. (2004): Unterschiede bei Lärmbelastung und Luftverschmutzung nach dem Haushaltseinkommen. In: Bolte, G., Mielck, A. (Hrsg.): Umweltgerechtigkeit. Die soziale Verteilung von Umweltbelastungen. Weinheim, München: Juventa Verlag, S. 139-153.

Mock, P. (2011): Evaluation of parameter-based vehicle emissions targets in the EU. How Regulatory Design Can Help Meet the 2020 CO_2 Target. Washington, DC: International Council on Clean Transportation. White Paper 10/2011. http://www.theicct.org/sites/default/files/publications/ICCT_EUemissionstargets_jun2011.pdf (10.10.2017).

Mock, P., German, J. (2015): The future of vehicle emissions testing and compliance. How to align regulatory requirements, customer expectations, and environmental performance in the European Union. Washington, DC: International Council on Clean Transportation. http://www.theicct.org/sites/default/files/publications/ICCT_future-vehicle-testing_20151123.pdf (17.07.2017).

Mock, P., Tietge, U., German, J., Bandivadekar, A. (2014): Road transport in the EU Emissions Trading System: An engineering perspective. Washington, DC: International Council on Clean Transportation. Working Paper 2014-11. http://www.theicct.org/sites/default/files/publications/ICCT_EU-ETS-perspective_20141204.pdf (04.08.2017).

Monse, J., Haßheider, H. (2017): Der neue Bundesverkehrswegplan 2030 – Verfahren, Schwerpunkte und zentrale Ergebnisse im Überblick. Zeitschrift für Verkehrswissenschaft 88, S. Im Erscheinen.

Mudd, G. M., Ward, J. D. (2008): Will Sustainability Constraints Cause „Peak Minerals“? University of Auckland. 3rd International Conference on Sustainability Engineering & Science: Blueprints for Sustainable Infrastructure. http://users.monash.edu.au/~gmudd/files/2008-NZ-SustEngSci-Mudd-Ward-SustConstraints-v-Peak-Minerals.pdf (24.07.2017).

Vorabfassung - wird durch die endgültige Fassung ersetzt.

Mullan, J., Harries, D., Bräunl, T., Whitely, S. (2012): The Technical, The technical, economic and commercial viability of the vehicle-to-grid concept. Energy Policy 48, S. 394–406.

Muncrief, R., Sharpe, B. (2015): Overview of the heavy-duty vehicle market and CO_2-emissions in the European Union. Washington, DC: International Council on Clean Transportation. Working Paper 2015-6. http://www.theicct.org/sites/default/files/publications/ICCT_EU-HDV_mkt-analysis_201512.pdf (14.09.2017).

Myhre, G., Shindell, D., Bréon, F.-M., Collins, W., Fuglestvedt, J., Huang, J., Koch, D., Lamarque, J.-F., Lee, D., Mendoza, B., Nakajima, T., Robock, A., Stephens, G., Takemura, T., Zhang, H. (2013): Anthropogenic and Natural Radiative Forcing. In: IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change) (Hrsg.): Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment. Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge, New York: Cambridge University Press, S. 659–740.

NABU (Naturschutzbund Deutschland) (2016): Dicke Pötte, dicker Rauch. Naturschutz heute 2016 (4), S. 16.

Naegler, T., Simon, S., Klein, M., Gils, H. C. (2016): Potenziale für erneuerbare Energien in der industriellen Wärmeerzeugung. BWK 68 (6), S. 20–24.

Nakajima, K., Takeda, O., Miki, T., Matsubae, K., Nakamura, S., Nagasaka, T. (2010): Thermodynamic analysis of contamination by alloying elements in aluminum recycling. Environmental Science & Technology 44 (14), S. 5594–5500.

Nakajima, K., Takeda, O., Miki, T., Nagasaka, T. (2009): Evaluation method of metal resource recyclability based on thermodynamic analysis. Materials Transactions 50 (3), S. 453–460.

Nelissen, D., Traut, M., Köhler, J., Mao, W., Faber, J., Ahdour, S. (2016): Study on the analysis of market potentials and market barriers for wind propulsion technologies for ships. Delft: CE Delft. http://www.cedelft.eu/?go=home.downloadPub&id=1891&file=CE_Delft_7G92_Wind_Propulsion_Technologies_Final_report.pdf (14.09.2017).

Nestle, U. (2017): Reformoptionen für die EEG-Umlage. Berlin: Heinrich Böll Stiftung. boell.brief – Grüne Ordnungspolitik 5.

NHTSA (National Highway Traffic Safety Administration) (2013): Preliminary statement of policy concerning automated vehicles. Washington, DC: NHTSA. https://www.nhtsa.gov/staticfiles/rulemaking/pdf/Automated_Vehicles_Policy.pdf (25.07.2017).

Nitsch, J. (2016): Die Energiewende nach COP 21 – Aktuelle Szenarien der deutschen Energieversorgung. Kurzstudie für den Bundesverband Erneuerbare Energien e.V. Stuttgart: Nitsch.

Nitsch, J., Pregger, T., Naegler, T., Heide, D., Tena, D. L. de, Trieb, F., Scholz, Y., Nienhaus, K., Gerhardt, N., Sterner, M., Trost, T., Oehsen, A. von, Schwinn, R., Pape, C., Hahn, H., Wickert, M., Wenzel, B. (2012): Langfristszenarien und Strategien für den Ausbau der erneuerbaren Energien in Deutschland bei Berücksichtigung der Entwicklung in Europa und global. Schlussbericht. Stuttgart, Kassel, Teltow: Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt, Institut für Technische Thermodynamik, Abt. Systemanalyse und Technikbewertung, Fraunhofer Institut für Windenergie und Energiesystemtechnik, Ingenieurbüro für neue Energien.

Nordenholz, F., Winkler, C., Knörr, W. (2016): Verkehrsverlagerungspotenzial auf den Schienenpersonenfernverkehr in Deutschland. Endbericht im Rahmen der Wissenschaftlichen Begleitung, Unterstützung und Beratung des BMVI in den Bereichen Verkehr und Mobilität mit besonderem Fokus auf Kraftstoffen und Antriebstechnologien sowie Energie und Klima. Berlin, Heidelberg, München/Ottobrunn, Leipzig: Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt, IFEU – Institut für Energie- und Umweltforschung, Ludwig-Bölkow-Systemtechnik, Deutsches Biomasseforschungszentrum.

NPE (Nationale Plattform Elektromobilität) (2016): Roadmap integrierte Zell- und Batterieproduktion Deutschland. Berlin: NPE.

NRC (National Research Council) (2013): Transitions to Alternative Vehicles and Fuels. Washington, DC: National Academies Press.

Nykvist, B., Nilsson, M. (2015): Rapidly falling costs of battery packs for electric vehicles. Nature Climate Change 5 (4), S. 329–332.

O'Neill, B. C., Oppenheimer, M., Warren, R., Stephane Hallegatte, Kopp, R. E., Pörtner, H. O., Scholes, R., Birkmann, J., Foden, W., Licker, R., Mach, K. J., Marbaix, P., Mastrandrea, M. D., Price, J., Takahashi, K., Ypersele,

Vorabfassung - wird durch die endgültige Fassung ersetzt.

J.-P. van, Yohe, G. (2017): IPCC reasons for concern regarding climate change risks. Nature Climate Change 7 (1), S. 28–37.

OECD (Organisation for Economic Co-operation and Development), FAO (Food and Agriculture Organization) (2007): OECD-FAO Agricultural Outlook 2007–2016. Paris: OECD.

Öko-Institut (2017): Strategien für die nachhaltige Rohstoffversorgung der Elektromobilität. Synthesepapier zum Rohstoffbedarf für Batterien und Brennstoffzellen. Berlin: Agora Verkehrswende.

Öko-Institut (2017): Elektromobilität – Faktencheck. Fragen und Antworten. Berlin: Öko-Institut. https://www.oeko.de/fileadmin/oekodoc/FAQ_Elektromobilitaet_Oeko-Institut_2017.pdf (09.10.2017).

Öko-Institut (2011): Seltene Erden – Daten & Fakten. Berlin: Öko-Institut. Hintergrundpapier. https://www.oeko.de/oekodoc/1110/2011-001-de.pdf (21.07.2017).

Öko-Institut, DLR – Institut für Verkehrsforschung, IFEU (Institut für Energie und Umweltforschung), INFRAS (2016): Renewbility III. Optionen einer Dekarbonisierung des Verkehrssektors. Endbericht. Berlin, Darmstadt, Freiburg, Heidelberg, Zürich: Öko-Institut, DLR – Institut für Verkehrsforschung, IFEU, INFRAS AG.

Öko-Institut, Fraunhofer ISI (Fraunhofer-Institut für System- und Innovationsforschung) (2015): Klimaschutzszenario 2050. 2. Endbericht. Berlin, Karlsruhe: Öko-Institut, Fraunhofer ISI. http://www.oeko.de/oekodoc/2451/2015-608-de.pdf (27.09.2016).

Oltra, V., Saint Jean, M. (2009): Sectoral systems of environmental innovation: An application to the French automotive industry. Technological Forecasting and Social Change 76 (4), S. 567–583.

Ostberg, S., Lucht, W., Schaphoff, S., Gerten, D. (2013): Critical impacts of global warming on land ecosystems. Earth System Dynamics Discussions 4 (2), S. 347–357. http://www.earth-syst-dynam.net/4/347/2013/esd-4-347-2013.pdf (23.06.2017).

Oudin Åström, D., Schifano, P., Asta, F., Lallo, A., Michelozzi, P., Rocklöv, J., Forsberg, B. (2015): The effect of heat waves on mortality in susceptible groups: a cohort study of a mediterranean and a northern European City. Environmental Health 14. https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC4397690/ (12.07.2017).

Pache, E. (2005): Möglichkeiten der Einführung einer Kerosinsteuer auf innerdeutschen Flügen. Dessau-Roßlau: Umweltbundesamt. UBA-Texte 12/05.

Palitzsch, W., Loser, U. (2014): Integrierte Wiederverwendung von Hightech- und Greentech-Abfällen. In: Kausch, P., Bertau, M., Gutzmer, J., Matschullat, J. (Hrsg.): Strategische Rohstoffe - Risikovorsorge. Heidelberg, Berlin: Springer Spektrum, S. 173–182.

Pannone, G. (2015): Technical Analysis of Vehicle Load Reduction Potential for Advanced Clean Cars (Contract 13-313). Final Report. Version 1.0. Allen Park, Mich.: Control-Tech LLC.

Pasaoglu, G., Honselaar, M., Thiel, C. (2012): Potential vehicle fleet CO_2 reductions and cost implications for various vehicle technology deployment scenarios in Europe. Energy Policy 40, S. 404–421.

Pehlken, A., Albers, H., Germer, F. (2017): Rotorblätter aus Windkraftanlagen. Herausforderungen für das Recycling. In: Thomé-Kozmiensky, K. J., Goldmann, D. (Hrsg.): Recycling und Rohstoffe. Bd. 10. Neuruppin: TK Verlag Karl J. Thomé-Kozmiensky, S. 247–260.

Pfeiffer, E.-M., Eschenbach, A., Munch, J. C. (2017): Boden. In: Brasseur, G., Jacob, D., Schuck-Zöller, S. (Hrsg.): Klimawandel in Deutschland. Entwicklung, Folgen, Risiken und Perspektiven. Berlin, Heidelberg: Springer, S. 203–214.

Pfluger, B., Tersteegen, B., Franke, B. (2017): Langfristszenarien für die Transformation des Energiesystems in Deutschland. Modul 3: Referenzszenario und Basisszenario. Karlsruhe, Aachen, Heidelberg: Fraunhofer-Institut für System- und Innovationsforschung ISI, Consentec, IFEU – Institut für Energie- und Umweltforschung.

Pilarsky, G. (2014): Wirtschaft am Rohstofftropf. Der Kampf um die wichtigsten mineralischen Ressourcen. Wiesbaden: Springer Gabler.

Pittel, K., Weissbart, C. (2016): Stabilisierung der EEG-Umlage durch zeitliche Streckung über Fonds („Streckungsfonds“). Gutachten. München: Ifo-Institut. http://www.cesifo-group.de/portal/page/portal/DocBase_Service/studien/Gutachten_Streckungsfonds_ifo.pdf (08.09.2017).

Vorabfassung - wird durch die endgültige Fassung ersetzt.

Plevin, R. J., Kammen, D. M. (2013): Indirect Land Use and Greenhouse Gas Impacts of Biofuels. In: Levin, S. A. (Hrsg.): Encyclopedia of Biodiversity. Vol. 4: Gr – Ma. Waltham, MA: Academic Press, S. 293–297.

Quante, M., Aulinger, A., Matthias, V. (2011): Der Schiffstransport und sein Beitrag zum Klimawandel. In: Lozán, J. L., Grassl, H., Karbe, L., Reise, K. (Hrsg.): Warnsignal Klima: Die Meere – Änderungen & Risiken. Wissenschaftliche Fakten. Hamburg: Wissenschaftliche Auswertungen, S. 286–293.

Quaschning, V. (2016): Sektorkopplung durch die Energiewende. Anforderungen an den Ausbau erneuerbarer Energien zum Erreichen der Pariser Klimaschutzziele unter Berücksichtigung der Sektorkopplung. Berlin: Hochschule für Technik und Wirtschaft. https://www.volker-quaschning.de/publis/studien/sektorkopplung/Sektorkopplungsstudie.pdf (14.07.2017).

Quicker, P., Stockschläder, J. (2017): Neue problematische Einsatzstoffe in der Abfallverbrennung. In: Thomé-Kozmiensky, K. J., Beckmann, M. (Hrsg.): Energie aus Abfall. Bd. 14. Neuruppin: TK Verlag Karl J. Thomé-Kozmiensky, S. 41–60.

Quitter, D. (2011): Hersteller von Offshore-Windenergieanlagen bauen auf Stahl. 04.05.2011. Würzburg: konstruktionspraxis. http://www.konstruktionspraxis.vogel.de/hersteller-von-offshore-windenergieanlagen-bauen-auf-stahl-a-314202/ (14.09.2017).

Raaschou-Nielsen, O., Andersen, Z. J., Beelen, R., Samoli, E., Stafoggia, M., Weinmayr, G., Hoffmann, B., Fischer, P., Nieuwenhuijsen, M. J., Brunekreef, B., Xun, W. W., Katsouyanni, K., Dimakopoulou, K., Sommar, J., Forsberg, B., Modig, L., Oudin, A., Oftedal, B., Schwarze, P. E., Nafstad, P., De Faire, U., Pedersen, N. L., Ostenson, C. G., Fratiglioni, L., Penell, J., Korek, M., Pershagen, G., Eriksen, K. T., Sorensen, M., Tjonneland, A., Ellermann, T., Eeftens, M., Peeters, P. H., Meliefste, K., Wang, M., Bueno-de-Mesquita, B., Key, T. J., Hoogh, K. de, Concin, H., Nagel, G., Vilier, A., Grioni, S., Krogh, V., Tsai, M. Y., Ricceri, F., Sacerdote, C., Galassi, C., Migliore, E., Ranzi, A., Cesaroni, G., Badaloni, C., Forastiere, F., Tamayo, I., Amiano, P., Dorronsoro, M., Trichopoulou, A., Bamia, C., Vineis, P., Hoek, G. (2013): Air pollution and lung cancer incidence in 17 European cohorts: prospective analyses from the European Study of Cohorts for Air Pollution Effects (ESCAPE). Lancet, Oncology 14 (9), S. 813–822.

Rahim, M. M., Islam, M. T., Kuruppu, S. (2016): Regulating global shipping corporations' accountability for reducing greenhousegas emissions in the seas. Marine Policy 69, S. 159–170.

Rahmstorf, S., Box, J. E., Feulner, G., Mann, M. E., Robinson, A., Rutherford, S., Schaffernicht, E. J. (2015): Exceptional twentieth-century slowdown in Atlantic Ocean overturning circulation. Nature Climate Change 5 (5), S. 475–448.

Rammler, S. (2016): Digitaler Treibstoff: Chancen und Risiken des Einsatzes digitaler Technologien und Medien im Mobilitätssektor. Düsseldorf: Hans-Böckler-Stiftung. Study der Hans-Böckler-Stiftung 310. https://www.econstor.eu/bitstream/10419/129072/1/848576705.pdf (25.07.2017).

Randall, T. (2016): Tesla Dominates U.S. Luxury Sedan Sales. New York, NY: Bloomberg. https://www.bloomberg.com/news/articles/2016-10-12/tesla-dominates-u-s-luxury-sedan-sales (21.07.2017).

RDW (2012): Road Pricing in Europe. 2nd version. Zoetermeer: RDW.

Reck, B. (2014): Funktionelles und nicht-funktionelles Recycling am Beispiel Edelstahl. In: Thomé-Kozmiensky, K. J., Goldmann, D. (Hrsg.): Recycling und Rohstoffe. Bd. 7. Neuruppin: TK Verlag Karl J. Thomé-Kozmiensky, S. 309–319.

Reichow, H. B. (1959): Die autogerechte Stadt. Ein Weg aus dem Verkehrs-Chaos. Ravensburg: Otto Maier.

Reller, A. (2016): Criticality of metal based functional materials – How multi-functional trans-technical metal based materials are mobilized and how they get lost by dissipation. Current Opinion in Green and Sustainable Chemistry 1, S. 25–27.

Reller, A., Bublies, T., Staudinger, T., Oswald, I., Meißner, S., Allen, M. (2009): The Mobile Phone: Powerful Communicator and Potential Metal Dissipator. GAIA 18 (2), S. 127–135.

Renewable Fuels Agency (2008): The Gallagher Review of the indirect effects of biofuels production. London: Renewable Fuels Agency.

Reuter, M., Oyj, O., Hudson, C., Schaik, A. van, Heiskanen, K., Meskers, C., Hagelüken, C. (2013): Metal Recycling.

Vorabfassung - wird durch die endgültige Fassung ersetzt.

Opportunities, Limits, Infrastructure. Nairobi: United Nations Environment Programme. Report of the Working Group on the Global Metal Flows to the International Resource Panel 2b. http://wedocs.unep.org/bitstream/handle/20.500.11822/8423/-Metal%20Recycling%20Opportunities%2c%20Limits%2c%20Infrastructure-2013Metal_recycling.pdf?sequence=3&isAllowed=y (12.09.2017).

Ricardo Energy & Environment (2017): Heavy Duty Vehicles Technology Potential and Cost Study. Final Report for the International Council on Clean Transportation (ICCT). Harwell: Ricardo Energy & Environment. Ricardo/ED61727/Issue Number 5b.

Ricardo Inc., Systems Research and Applications Corporation (2011): Computer Simulation of Light-Duty Vehicle Technologies for Greenhouse Gas Emission Reduction in the 2020–2025 Timeframe. Report prepared for EPA. Washington, DC: United States Environmental Protection Agency. https://cfpub.epa.gov/si/si_public_file_download.cfm?p_download_id=506021 (08.09.2017).

Robine, J. M., Cheung, S. L., Roy, S. L., Oyen, H. V., Herrmann, F. R. (2007): Report on excess mortality in Europe during summer 2003. (EU Community Action Programme for Public Health, Grant Agreement 2005114). Brüssel: Europäische Kommission.

Rodi, M., Schäfer-Stradowsky, S. (2017): Digitale Mobilitätsplattformen. Studie zur rechtlichen Weiterentwicklung des Personenbeförderungsgesetzes unter besonderer Berücksichtigung digitaler Mobilitätsplattformen Vortrag, Abschlussworkshop, 11.07.2017, Berlin.

Rodríguez, F., Muncrief, R., Delgado, O., Baldino, C. (2017): Market peneration of Fuel-efficiency technologies for heavy-duty vehicles in the European Union, the United States, and China. Berlin: Internaitonal Council on Clean Transportation. White Paper. http://www.theicct.org/sites/default/files/publications/HDV-market-penetration_ICCT_White-Paper_050917_vF_corrected.pdf (14.09.2017).

Rogelj, J., Schaeffer, M., Friedlingstein, P., Gillett, N. P., Vuuren, D. P. van, Riahi, K., Allen, M., Knutti, R. (2016): Differences between carbon budget estimates unravelled. Nature Climate Change 6 (3), S. 245–252.

Roland Berger - Automotive Competence Center, fka (Forschungsgesellschaft Kraftfahrwesen mbH Aachen) (2017): Index Elektromobilität Q1/2017. München, Aachen: Roland Berger- Automotive Competence Center, fka. https://www.rolandberger.com/publications/publication_pdf/roland_berger_e_mobilit_ts_index_q1_2017_final_d_mod.pdf (26.07.2017).

Rosenzweig, C., Elliott, J., Deryng, D., Ruane, A. C., Müller, C., Arneth, A., Boote, K. J., Folberth, C., Glotter, M., Khabarov, N., Neumann, K., Piontek, F., Pugh, T. A. M., Schmid, E., Stehfest, E., Yang, H., Jones, J. W. (2014): Assessing agricultural risks of climate change in the 21st century in a global gridded crop model intercomparison. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America 111 (9), S. 3268–3273.

Roth, K. (2014): The Unintended Consequences of Uncoordinated Regulation: Evidence from the Transportation Sector. Irvine, Calif.: Department of Economics, University of California-Irvine. https://editorialexpress.com/cgi-bin/conference/download.cgi?db_name=IAAE2014&paper_id=484 (08.09.2017).

Rudolph, F., Koska, T., Schneider, C. (2017): Verkehrswende für Deutschland. Der Weg zu CO_2-freier Mobilität bis 2035. Langfassung. Erstellt im Auftrag von Greenpeace durch Wuppertal Institut für Klima, Umwelt, Energie. Hamburg: Greenpeace. http://www.greenpeace.de/sites/www.greenpeace.de/files/20170830-greenpeace-kursbuch-mobilitaet-langfassung.pdf.pdf (21.09.2017).

Runkel, M., Mahler, A., Kunz, C. (2016a): Maßnahmen und Instrumente für die Energiewende im Verkehr. Berlin: Agentur für Erneuerbare Energien. Metaanalyse. http://www.forschungsradar.de/fileadmin/content/bilder/Vergleichsgrafiken/meta_verkehrsinstrumente_2016/AEE_Metaanalyse_Verkehrsinstrumente_jul16.pdf (09.02.2017).

Runkel, M., Mahler, A., Kunz, C. (2015): Energiewende im Verkehr. Berlin: Agentur für Erneuerbare Energien. Metaanalyse. http://www.forschungsradar.de/fileadmin/content/bilder/Vergleichsgrafiken/meta_verkehr_2015/AEE_Metaanalyse_Verkehr_nov15_fixed.pdf (09.02.2017).

Runkel, M., Mahler, A., Schmitz, J., Schäfer-Stradowsky, S. (2016b): Umweltwirkungen von Diesel im Vergleich zu anderen Kraftstoffen. Bewertung der externen Kosten der Dieseltechnologie im Vergleich zu anderen Kraftstoffen und Antrieben. Berlin: Forum Ökologisch-Soziale Marktwirtschaft e.V. www.foes.de/pdf/2016-05-FOES-IKEM-Studie-Umweltwirkungen-Diesel.pdf (08.09.2017).

Vorabfassung - wird durch die endgültige Fassung ersetzt.

Rüttinger, L., Griestop, L. (2015): Initiative für Transparenz im rohstoffgewinnenden Sektor (EITI). UmSoRess Steckbrief. Berlin: adelphi. https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/378/dokumente/umsoress_kurzsteckbrief_eiti_final.pdf (09.10.2017).

Rüttinger, L., Griestop, L., Heidegger, J. (2015a): International Council on Mining and Metals (ICMM). UmSoRess Steckbrief. Berlin: adelphi. https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/378/dokumente/umsoress_kurzsteckbrief_icmm_final_aktualisiert.pdf (09.10.2017).

Rüttinger, L., Schüler, F., Scholl, C., Bach, A. (2016): Die deutschen Rohstoffpartnerschaften. Analyse der Umsetzung und Ausblick. Dessau-Roßlau: Umweltbundesamt. RohPolRess-Kurzanalyse 6. https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/1968/dokumente/2017-02-01_rohpolress_ka_6_rohstoffpartnerschaften.pdf (10.07.2017).

Rüttinger, L., Treimer, R., Tiess, G., Griestop, L. (2015b): Fallstudie zu den Umwelt- und Sozialauswirkungen der Goldgewinnung in Witwatersrand, Südafrika. Berlin: adelphi. https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/378/dokumente/umsoress_fallstudie_gold_suedafrika_final_neu.pdf (12.09.2017).

Rüttinger, L., Treimer, R., Tiess, G., Griestop, L. (2014a): Fallstudie zu den Umwelt- und Sozialauswirkungen der Kupfergewinnung in Mopani, Sambia. Berlin: adelphi. https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/378/dokumente/umsoress_fallstudie_kupfer_sambia.pdf (12.09.2017).

Rüttinger, L., Treimer, R., Tiess, G., Griestop, L., Schüler, F., Wittrock, J. (2014b): Fallstudie zu den Umwelt- und Sozialauswirkungen der Gewinnung Seltener Erden in Bayan Obo, China. Berlin: adelphi. https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/378/dokumente/umsoress_fallstudie_seltene_erden_china_bayan_obo.pdf (12.09.2017).

Rüttinger, L., Wittmer, D., Scholl, C., Bach, A. (2015c): OECD-Leitsätze für multinationale Unternehmen, OECD-Leitlinien für die Erfüllung der Sorgfaltspflicht zur Förderung verantwortungsvoller Lieferketten für Mineralien aus Konflikt- und Hochrisikogebieten. UmSoRess Steckbrief. Berlin: adelphi. https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/378/dokumente/umsoress_kurzsteckbrief_eiti_final.pdf (09.10.2017).

SAE International – ORAD (SAE International – On-Road Automated Driving Committee) (2016): Taxonomy and definitions for terms related to on-road motor vehicle automated driving systems. Warrendale, PA: SAE International – ORAD. Technical Report J3016_201609.

Sander, K., Gößling-Reisemann, S., Zimmermann, T., Marscheider-Weidemann, F., Wilts, H., Schebeck, L., Wagner, J., Heegn, H., Pehlken, A. (2017a): Recyclingpotential strategischer Metalle (ReStra). Dessau-Roßlau: Umweltbundesamt. UBA-Texte 68/2017. https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/1410/publikationen/2017-08-21_texte_68-2017_restra_0.pdf (14.09.2017).

Sander, K., Kohlmeyer, R., Rödig, L., Wagner, L. (2017b): Altfahrzeuge – Verwertungsquote 2015 und Hochwertigkeit der Verwertung. In: Thomé-Kozmiensky, K. J., Goldmann, D. (Hrsg.): Recycling und Rohstoffe. Bd. 10. Neuruppin: TK Verlag Karl J. Thomé-Kozmiensky, S. 305–325.

Santarius, T. (2012): Der Rebound-Effekt. Über die unerwünschten Folgen der erwünschten Energieeffizienz. Wuppertal: Wuppertal Institut für Klima, Umwelt, Energie. Impulse zur WachstumsWende 5. http://www.santarius.de/wp-content/uploads/2012/03/Der-Rebound-Effekt-2012.pdf (06.11.2015).

Schewe, J., Heinke, J., Gerten, D., Haddeland, I., Arnell, N. W., Clark, D. B., Dankers, R., Eisner, S., Fekete, B. M., Colón-González, F. J., Gosling, S. N., Kim, H., Liu, X., Masaki, Y., Portmann, F. T., Satoh, Y., Stacke, T., Tang, Q., Wadar, Y., Wissers, D., Albrecht, T., Frieler, K., Piontek, F., Warszawski, L., Kabat, P. (2014): Multimodel assessment of water scarcity under climate change. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America 111 (9), S. 3245–3250.

Schiller, G., Ortlepp, R., Krauß, N., Steger, S., Schütz, H., Fernández, J. A., Reichenbach, J., Wagner, J., Baumann, J. (2015): Kartierung des anthropogenen Lagers in Deutschland zur Optimierung der Sekundärrohstoffwirtschaft. Dessau-Roßlau: Umweltbundesamt. UBA-Texte 83/2015. https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/378/publikationen/texte_83_2015_kartierung_des_anthropogenen_lagers.pdf (11.09.2017).

Schlesinger, M., Hofer, P., Kemmler, A., Kirchner, A., Koziel, S., Ley, A., Piégsa, A., Seefeldt, F., Straßburg, S., Weinert, K., Lindenberger, D., Knaut, A., Malischek, R., Nick, S., Panke, T., Paulus, S., Tode, C., Wagner, J., Lutz, C., Lehr, U., Ulrich, P. (2014): Entwicklung der Energie-

Vorabfassung - wird durch die endgültige Fassung ersetzt.

märkte – Energiereferenzprognose. Projekt Nr. 57/12 des Bundesministeriums für Wirtschaft und Technologie. Basel, Köln, Osnabrück: Energiewirtschaftliches Institut an der Universität zu Köln, Prognos AG, Gesellschaft für wirtschaftliche Strukturforschung.

Schmid, D., Zur-Lage, L. (2014): Perspektiven für das Recycling von Altfahrzeugen. Moderne Fahrzeuge und angepasste Recyclingverfahren. In: Thomé-Kozmiensky, K. J., Goldmann, D. (Hrsg.): Recycling und Rohstoffe. Bd. 7. Neuruppin: TK Verlag Karl J. Thomé-Kozmiensky, S. 105–126.

Schmidt, P., Weindorf, W., Roth, A., Batteiger, V., Riegel, F. (2016): Power-to-Liquids. Potentials and Perspectives for the Future Supply of Renewable Aviation Fuel. Dessau-Roßlau: Umweltbundesamt. Background. https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/377/publikationen/161005_uba_hintergrund_ptl_barrierrefrei.pdf (08.09.2017).

Schmied, M., Wüthrich, P., Zah, R., Althaus, H.-J., Friedl, C. (2015): Postfossile Energieversorgungsoptionen für einen treibhausgasneutralen Verkehr im Jahr 2050: Eine verkehrsträgerübergreifende Bewertung. Dessau-Roßlau: Umweltbundesamt. Texte 30/2015.

Scholl, G., Gossen, M., Holzhauer, B. (2017): Teilen digital – Verbreitung, Zielgruppen und Potenziale des Peer-to-Peer Sharing in Deutschland. Ergebnisse einer repräsentativen Bevölkerungsbefragung. Berlin: Institut für ökologische Wirtschaftsforschung. www.peer-sharing.de/data/peersharing/user_upload/PeerSharing_Broschüre_Teilen_digital.pdf (26.07.2017).

Schroten, A., Warringa, G., Bles, M. (2012): Marginal abatement cost curves for Heavy Duty Vehicles. Background report. Delft: CE Delft. https://ec.europa.eu/clima/sites/clima/files/transport/vehicles/heavy/docs/hdv_2012_co2_abatement_cost_curves_en.pdf (14.09.2017).

Schüler, D., Buchert, M., Liu, R., Dittrich, S., Merz, C. (2011): Study on Rare Earths and Their Recycling. Final Report for the Greens/EFA Group in the European Parliament. Freiburg, Darmstadt, Berlin: Öko-Institut.

Schüler, D., Bulach, W., Degreif, S., Buchert, M., Sellin, G., Elwert, T., Goldmann, D., Schmid, D., Kammer, U. (2017): Elektrofahrzeugrecycling 2020 – Schlüsselkomponente Leistungselektronik ElmoReL 2020. Endbericht. Darmstadt, Clausthal-Zellerfeld, Wolfsburg, Langelsheim, Goslar: Öko-Institut, TU Clausthal, Volkswagen AG, PPM Pure Metals GmbH, Electrocycling GmbH. http://www.resourcefever.org/files/publications/reports/BMUB_16EM2032-1_ElmoRel_Endbericht_inkl_%C3%96kobilanzen.pdf (08.09.2017).

Seiler, E., Woidasky, J. (2013): Recycling von Windkraftanlagen. Vortrag, Hamburg TREND 2013, 05.–06.02.2013, Hamburg.

Seitz, M., Kroban, M., Pitschke, T., Kreibe, S. (2013): Ökoeffizienzanalyse von Photovoltaikmodulen. Augsburg: bifa Umweltinstitut. bifa-Text 62.

Senatsverwaltung für Stadtentwicklung und Umwelt Berlin (2015): Umweltatlas Berlin. 03.12: Langjährige Entwicklung der Luftqualität. Ausgabe 2016. Berlin: Senatsverwaltung für Stadtentwicklung und Umwelt. http://www.stadtentwicklung.berlin.de/umwelt/umweltatlas/d312_01.htm (24.07.2017).

Serrano-González, J., Lacal-Arántegui, R. (2016): Technological evolution of onshore wind turbines – a market-based analysis. Wind Energy 19 (12), S. 2171–2187.

Sharpe, B., Delgado, O., Muncrief, R. (2014): Comparative Assessment of heavy-duty vehicle regulatory design options for U.S. greenhouse gas and efficiency regulation. Washington, DC: International Council on Clean Transportation. White Paper. http://www.theicct.org/sites/default/files/publications/ICCT_US-HDV-Phase2_RegDesignOptions_20141029.pdf (09.10.2017).

Shi, Y. (2016): Reducing greenhouse gas emissions from international shipping: Is it time to consider market-based measures? Marine Policy 64, S. 123–134.

Skeete, J.-P. (2017): Examining the role of policy design and policy interaction in EU automotive emissions performance gaps. Energy Policy 104, S. 373–381.

Smith, K. A., Mosier, A. R., Crutzen, P. J., Winiwarter, W. (2012): The role of N2O derived from crop-based biofuels, and from agriculture in general, in Earth's climate. Philosophical Transactions of the Royal Society / B 367 (1593), S. 1169–1174.

Smith, K. A., Searchinger, T. D. (2012): Crop-Based Biofuels and Associated Environmental Concerns. GCB Bioenergy 4 (5), S. 479–484.

Vorabfassung - wird durch die endgültige Fassung ersetzt.

Smokers, R., Skinner, I., Kampman, B., Fraga, F., Hill, N. (2012): EU Transport GHG: Routes to 2050 II. Final Report Appendix 5: Identification of the major risks/uncertainties associated with the achievability of considered policies and measures. Didcot, Delft, London: AEA, CE Delft, Transport and Environmental Policy Research, TNO. Final Task 5 Paper. http://www.eutransportghg2050.eu/cms/assets/Uploads/Reports/EU-Transport-GHG-2050-II-Task-5-FINAL-28May12.pdf (08.09.2017).

Sommer, C., Schäfer, F., Löcker, G. (2016): ÖPNV strukturiert planen. Der Nahverkehr 2016 (10), S. 40–45.

Sorrell, S. (2007): The Rebound Effect: An assessment of the evidence for economy-wide energy savings from improved energy efficiency. London: UK Energy Research Centre.

Spohr, M. (2016): Human Rights Risks in Mining. A Baseline Study. Hannover: Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe. https://www.bgr.bund.de/DE/Themen/Zusammenarbeit/TechnZusammenarbeit/Downloads/human_rights_risks_in_mining.pdf?__blob=publicationFile&v=2 (11.09.2017).

SRU (Sachverständigenrat für Umweltfragen) (2017): Kohleausstieg jetzt einleiten. Berlin: SRU. Stellungnahme.

SRU (2016a): Umweltgutachten 2016. Impulse für eine integrative Umweltpolitik. Berlin: Erich Schmidt.

SRU (2016b): Zum Entwurf des Klimaschutzplans 2050. Berlin: SRU. Kommentar zur Umweltpolitik 18. https://www.umweltrat.de/SharedDocs/Downloads/DE/05_Kommentare/2016_2020/2016_11_KzU_18_Kommentar_Klimaschiutzplan.pdf?__blob=publicationFile&v=4 (11.07.2017).

SRU (2015a): 10 Thesen zur Zukunft der Kohle bis 2040. Berlin: SRU. Kommentar zur Umweltpolitik 14.

SRU (2015b): Stickstoff: Lösungsstrategien für ein drängendes Umweltproblem. Sondergutachten. Berlin: Erich Schmidt.

SRU (2014): Fluglärm reduzieren: Reformbedarf bei der Planung von Flughäfen und Flugrouten. Sondergutachten. Berlin: Erich Schmidt.

SRU (2013): Den Strommarkt der Zukunft gestalten. Sondergutachten. Berlin: Erich Schmidt.

SRU (2012): Umweltgutachten 2012. Verantwortung in einer begrenzten Welt. Berlin: Erich Schmidt.

SRU (2011a): Ökologische Leitplanken setzen, natürliche Lebensgrundlagen schützen – Empfehlungen zum Fortschrittsbericht 2012 zur nationalen Nachhaltigkeitsstrategie. Berlin: SRU. Kommentar zur Umweltpolitik 9.

SRU (2011b): Wege zur 100 % erneuerbaren Stromversorgung. Sondergutachten. Berlin: Erich Schmidt.

SRU (2007): Klimaschutz durch Biomasse. Sondergutachten. Berlin: Erich Schmidt.

SRU (2005): Umwelt und Straßenverkehr. Hohe Mobilität – Umweltverträglicher Verkehr. Sondergutachten. Baden-Baden: Nomos.

SRU (1973): Auto und Umwelt. Gutachten vom September 1973. Stuttgart: Kohlhammer.

Stahl, H., Bauknecht, D., Hermann, A., Jenseit, W., Köhler, A. R., Merz, C., Möller, M., Schüler, D., Vogel, M., Jörissen, L., Storr, U. (2016): Ableitung von Recycling und Umweltanforderungen und Strategien zur Vermeidung von Versorgungsrisiken bei innovativen Energiespeichern. Dessau-Roßlau: Umweltbundesamt. UBA-Texte 07/2016.

State of California, Department of Motor Vehicles (2017): Autonomous Vehicle Disengagement Reports 2016. Sacramento, Calif.: State of California, Department of Motor Vehicles. https://www.dmv.ca.gov/portal/dmv/detail/vr/autonomous/disengagement_report_2016 (25.07.2017).

Statistisches Bundesamt (2017a): Statistisches Jahrbuch. Deutschland und Internationales 2017. Wiesbaden: Statistisches Bundesamt.

Statistisches Bundesamt (2017b): Verkehr. Güterverkehr. Wiesbaden: Statistisches Bundesamt. https://www.destatis.de/DE/ZahlenFakten/Wirtschaftsbereiche/TransportVerkehr/Gueterverkehr/Tabellen/GueterbefoerderungLR.html (18.07.2017).

Statistisches Bundesamt (2017c): Volkswirtschaftliche Gesamtrechnung. Bruttoinlandsprodukt ab 1970. Vierteljahres- und Jahresergebnisse. 1. Vierteljahr 2017. Stand: Mai 2017. Wiesbaden: Statistisches Bundesamt. https://www.destatis.de/DE/ZahlenFakten/Gesamtwirtschaft-Umwelt/VGR/Inlandsprodukt/Tabellen/Bruttoinland-

Vorabfassung - wird durch die endgültige Fassung ersetzt.

Vierteljahresdaten_pdf.pdf?__blob=publicationFile (18.07.2017).

Statistisches Bundesamt (2013): Verkehr auf einen Blick. Wiesbaden: Statistisches Bundesamt.

Steckling, N., Devleesschauwer, B., Winkelnkemper, J., Fischer, F., Ericson, B., Krämer, A., Hornberg, C., Fuller, R., Plass, D., Bose-O'Reilly, S. (2017): Disability Weights for Chronic Mercury Intoxication Resulting from Gold Mining Activities: Results from an Online Pairwise Comparisons Survey. International Journal of Environmental Research and Public Health 14 (1), S. 57.

Sterner, M., Thema, M., Eckert, F., Moser, A., Schäfer, A., Drees, T., Rehtanz, C., Häger, U., Kays, J., Seack, A., Sauer, D. U., Leuthold, M., Stöcker, P. (2014): Stromspeicher in der Energiewende. Untersuchung zum Bedarf an neuen Stromspeichern in Deutschland für den Erzeugungsausgleich, Systemdienstleistungen und im Verteilnetz. Berlin: Agora Energiewende.

Stetten, A., Zangl, B. (2013): Certifying Natural Resources – A Comparative Study on Best Practice and Future Scenarios for the Certification of Trading Chains in Mineral Production. Hannover: Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe. https://www.bgr.bund.de/EN/Themen/Min_rohstoffe/CTC/Downloads/certifying_natural_resoures_2013.pdf?__blob=publicationFile&v=3 (11.09.2017).

Süddeutsche Zeitung (28.09.2017): China führt Quote für E-Autos ein. http://www.sueddeutsche.de/wirtschaft/e-mobilitaet-china-fuehrt-quote-fuer-e-autos-ein-1.3687137 (28.09.2017).

Süddeutsche Zeitung (30.10.2016): Deutsche Autohersteller sind entsetzt über chinesische Elektroquote. http://www.sueddeutsche.de/wirtschaft/e-autos-deutsche-automobilhersteller-sind-entsetzt-ueber-chinesische-elekroquote-1.3228492 (21.07.2017).

Süddeutsche Zeitung (18.05.2016): Von Amerika lernen. S. 2.

Suh, S., Bergesen, J. D., Gibon, T., Hertwich, E. G., Michael, T. (2017): Green Technology Choices: The Environmental and Resource Implications of Low-Carbon Technologies. International Resource Panel Report. Nairobi: United Nations Environment Programme.

Sutter, D., Maibach, M., Bertschmann, D., Ickert, L., Peter, M. (2016): Finanzierung einer nachhaltigen Güterverkehrsinfrastruktur. Anforderungen und Rahmenbedingungen für eine zukunftsorientierte Entwicklung des Güterverkehrs – eine systematische Analyse auf der Grundlage eines Ländervergleichs. Teilvorhaben ohne Luftverkehr. Dessau-Roßlau: Umweltbundesamt. UBA-Texte 53/2016.

Talebpour, A., Mahmassani, H. S. (2016): Influence of connected and autonomous vehicles on traffic flow stability and throughput. Transportation Research, Part C: Emerging Technologies 71, S. 143–163.

Thamling, N., Pehnt, M., Kirchner, J. (2015): Hintergrundpapier zur Energieeffizienzstrategie Gebäude. Erstellt im Rahmen der Wissenschaftlichen Begleitforschung zur Erarbeitung einer Energieeffizienzstrategie Gebäude. Berlin, Heidelberg, Darmstadt: Prognos AG, Institut für Energie und Umweltforschung, Institut für Wohnen und Umwelt.

Tietge, U., Díaz, S., Mock, P., German, J., Bandivadekar, A., Ligterink, N. (2016): From Laboratory to Road. A 2016 Update to Official and 'Real-World' Fuel Compumption and CO_2 Values for Pasenger Cars in Europe. Washington, DC: International Council on Clean Transportation. www.theicct.org/sites/default/files/publications/ICCT_LaboratoryToRoad_2016.pdf (17.07.2017).

Transport & Environment (2016): Dieselgate: Who? What? How? Brüssel: Transport & Environment. https://www.transportenvironment.org/sites/te/files/publications/2016_09_Dieselgate_report_who_what_how_FINAL_0.pdf (08.09.2017).

Treffer, F. (2011): Entwicklung eines realisierbaren Recyclingkonzeptes für die Hochleistungsbatterien zukünftiger Elektrofahrzeuge – Lithium-Ionen Batterierecycling Initiative – LiBRi. Verbundprojekt. Gemeinsamer Abschlussbericht des Konsortiums. Hanau: Umicore. http://www.erneuerbar-mobil.de/sites/default/files/publications/abschlussbericht-libri_1.pdf (24.07.2017).

Tröltzsch, J., Görlach, B., Lückge, H., Peter, M., Sartorius, C. (2012): Kosten und Nutzen von Anpassungsmaßnahmen an den Klimawandel. Analyse von 28 Anpassungsmaßnahmen in Deutschland. Dessau-Roßlau: Umweltbundesamt. Climate Change 10/2012. https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/461/publikationen/4298.pdf (12.07.2017).

Vorabfassung - wird durch die endgültige Fassung ersetzt.

UBA (Umweltbundesamt) (2017a): Daten zur Umwelt 2017. Indikatorenbericht. Stand: April 2017. Dessau-Roßlau: UBA.

UBA (2017b): Daten. Luftbelastung. Luftschadstoff-Emissionen in Deutschland. Stickstoffoxid-Emissionen. Stand: 12.06.2017. Dessau-Roßlau: UBA. https://www.umweltbundesamt.de/daten/luftbelastung/luftschadstoff-emissionen-in-deutschland/stickstoffoxid-emissionen#textpart-1 (24.07.2017).

UBA (2017c): Daten. Umwelt-Indikatoren. Indikator: Emission von Treibhausgasen. Stand: 02.06.2017. Dessau-Roßlau: UBA. https://www.umweltbundesamt.de/indikator-emission-von-treibhausgasen (07.09.2017).

UBA (2017d): Daten. Verkehr. Endenergieverbrauch und Energieeffizienz des Verkehrs. Endenergieverbrauch steigt seit 2010 wieder an. Stand: 06.04.2017. Dessau-Roßlau: UBA. https://www.umweltbundesamt.de/daten/verkehr/endenergieverbrauch-energieeffizienz-des-verkehrs#textpart-1 (24.04.2017).

UBA (2017e): Daten. Verkehr. Fahrleistungen, Verkehrsaufwand und Modal Split. Stand: 06.04.2017. Dessau-Roßlau: UBA. https://www.umweltbundesamt.de/daten/verkehr/fahrleistungen-verkehrsaufwand-modal-split#textpart-1 (02.11.2017).

UBA (2017f): Luftqualität 2016. Vorläufige Auswertung. Dessau-Roßlau: UBA. Hintergrund.

UBA (2017g): Nationale Trendtabellen für die deutsche Berichterstattung atmosphärischer Emissionen 1990–2015. Stand: 30.01.2017. Dessau-Roßlau: UBA. (18.07.2017).

UBA (2017h): Themen. Klima/Energie. Treibhausgas-Emissionen. Stand: 20.03.2017. Dessau-Roßlau: UBA. https://www.umweltbundesamt.de/themen/klima-energie/treibhausgas-emissionen (06.10.2017).

UBA (2017i): UBA-Emissionsdaten für 2016. Dessau-Roßlau: UBA. https://www.umweltbundesamt.de/galerie/uba-emissionsdaten-fuer-2016 (18.07.2017).

UBA (2017j): Urban Mining – Ressourcenschonung im Anthropozän. Dessau: UBA. https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/1968/publikationen/uba_broschuere_urbanmining_rz_screen.pdf (11.09.2017).

UBA (2016a): Daten. Umwelt und Gesundheit. Lärmkartierung und Lärmaktionsplanung. Stand: 11.03.2016. Dessau-Roßlau: UBA. https://www.umweltbundesamt.de/daten/umwelt-gesundheit/laermkartierung-laerm-aktionsplanung (24.07.2017).

UBA (2016b): Die Nutzung natürlicher Ressourcen. Bericht für Deutschland 2016. Dessau-Roßlau: UBA.

UBA (2016c): Schwerpunkte 2016. Der Preis der Schönheit. Geld und Umwelt. Nachhaltiger Konsum. Jahrespublikation des Umweltbundesamtes. Dessau-Roßlau: UBA.

UBA (2016d): Stellungnahme des Umweltbundesamtes zum Entwurf des BVWP 2030 mit Umweltbericht. Dessau-Roßlau: UBA. https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/376/dokumente/stellungnahme_des_umweltbundesamtes_zum_entwurf_des_bundesverkehrswegeplans_2030_mit_umweltbericht.pdf (19.07.2017).

UBA (2016e): Themen. Verkehr/Lärm. Emissionsdaten. Stand: 25.07.2016. Dessau-Roßlau: UBA. https://www.umweltbundesamt.de/themen/verkehr-laerm/emissionsdaten#textpart-3 (30.06.2017).

UBA (2016f): Themen. Verkehr/Lärm. Verkehrslärm. Schienenverkehrslärm. Stand: 11.08.2016. Dessau-Roßlau: UBA. https://www.umweltbundesamt.de/themen/verkehr-laerm/verkehrslaerm/schienenverkehrslaerm#textpart-1 (14.09.2017).

UBA (2016g): Umweltschädliche Subventionen in Deutschland. Aktualisierte Ausg. 2016. Dessau-Roßlau: UBA.

UBA (2015a): Daten zur Umwelt 2015. Umwelttrends in Deutschland. Stand: Juni 2015. Dessau-Roßlau: UBA.

UBA (2015b): Maut für Deutschland: Jeder Kilometer zählt. Der Beitrag einer Lkw-, Bus- und Pkw-Maut zu einer umweltorientierten Verkehrsinfrastrukturfinanzierung. Dessau-Roßlau: UBA. UBA-Position. https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/376/publikationen/maut_fuer_deutschland_jeder_kilometer_zaehlt_web.pdf (18.07.2017).

UBA (2014): Treibhausgasneutrales Deutschland im Jahr 2050. Dessau-Roßlau: UBA. Climate Change 07/2014.

UBA (2013): Kurzfristig kaum Lärmminderung durch Elektroautos. Dessau-Roßlau: UBA. UBA-Position.

Vorabfassung - wird durch die endgültige Fassung ersetzt.

https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/377/dokumente/position_kurzfristig_kaum_laermminderung_im_verkehr.pdf (10.07.2017).

UBA (2012): Daten zum Verkehr. Dessau-Roßlau: UBA.

UBA (2009): Feinstaubbelastung in Deutschland. Dessau-Roßlau: UBA. http://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/publikation/long/3565.pdf (21.03.2014).

UNCTAD (United Nations Conference on Trade and Development) (2014): Review of Maritime Transport 2014. Genf: UNCTAD. http://unctad.org/en/PublicationsLibrary/rmt2014_en.pdf (20.07.2017).

UNEP (United Nations Environment Programme) (2011): Recycling Rates of Metals. A Status Report. Nairobi: UNEP. Report of the Global Metal Flows working group of the International Panel on Sustainable Resource Management of UNEP 2.

UNFCCC (United Nations Framework Convention on Climate Change) (2015): Adoption of the Paris Agreement. Proposal by the President. Draft decision -/CP.21. Geneva: United Nations. FCCC/CP/2015/L.9/Rev.1.

UNFCCC (2011): Report of the Conference of the Parties serving as the meeting of the Parties to the Kyoto Protocol on its sixth session, held in Cancun from 29 November to 10 December 2010. Addendum. Part Two: Action taken by the Conference of the Parties serving as the meeting of the Parties to the Kyoto Protocol at its sixth session. Geneva: United Nations. FCCC/KP/CMP/2010/12/Add.2.

Unruh, G. C. (2000): Understanding carbon lock-in. Energy Policy 28 (12), S. 817–830.

Urry, J. (2006): Inhabiting the car. The Sociological Review 54 (s1), S. 17–31.

VDA (Verband der Automobilindustrie) (2015): Automatisierung – Von Fahrerassistenzsystemen zum automatisierten Fahren. Berlin: VDA.

VDM (Verband Deutscher Metallhändler) (2007): Qualitätsgemeinschaft Kabelzerleger im Verband Deutscher Metallhändler e.V. Berlin: VDM. http://www.vdm.berlin/resources/02_Themen/05_Kabelzerlegung/2007_QG_Kabelzerleger.pdf (14.09.2017).

VDMA (Verband Deutscher Deutscher Maschinen- und Anlagenbau) (2017): Kurs „Maritime Energiewende“ – ein Dialogpapier. Frankfurt am Main: VDMA.

VDMA, SEMI (Semiconductor Equipment and Materials International) (2017): International Technology Roadmap for Photovoltaic (ITRPV). 2016 Results including maturity report. 8th ed. Frankfurt am Main, Milpitas, Calif.: VDMA, SEMI. http://www.itrpv.net/.cm4all/iproc.php/ITRPV%20Eighth%20Edition%202017-%20Maturity%20Report%2020170906.pdf?cdp=a (14.09.2017).

VDR (Verband Deutscher Reeder) (2017a): Daten & Fakten zur Seeschifffahrt in Deutschland. Hamburg: VDR. http://www.reederverband.de/daten-und-fakten/infopool.html (01.08.2017).

VDR (2017b): Schifffahrt auf Kurs für noch bessere Klimabilanz. Hamburg: VDR. VDR-Informationspapier. http://www.reederverband.de/fileadmin/vdr/pdf/themen_und_positionen/klima/VDR-Informationspapier-CO2_deutsch2017.pdf (24.07.2017).

Verbundprojekt LithoRec II (2016): LithoRec II – Recycling von Lithium-Ionen-Batterien. Abschlussberichte der beteiligten Verbundpartner. Berlin: Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit. http://www.erneuerbar-mobil.de/sites/default/files/2017-01/Abschlussbericht_LithoRec_II_20170116.pdf (24.07.2017).

Vidal, O., Goffeé, B., Arndt, N. (2013): Metals for a low-carbon society. Nature Geoscience 6 (11), S. 894–896.

Viebahn, P., Arnold, K., Friege, J., Krüger, C., Nebel, A., Samadi, S., Soukup, O., Ritthof, M., Teubler, J., Wiesen, K. (2014): KRESSE. Kritische mineralische Ressourcen und Stoffströme bei der Transformation des deutschen Energieversorgungssystems. Abschlussbericht. Wuppertal: Wuppertal Institut für Klima, Umwelt, Energie. https://epub.wupperinst.org/files/5419/5419_KRESSE.pdf (21.07.2017).

Voet, E. van der, Salminen, R., Eckelman, M., Mudd, G., Norgate, T., Hischier, R. (2013): Environmental Risks and Challenges of Anthropogenic Metals Flows and Cycles. Nairobi: United Nations Environment Programme. Report of the Working Group on the Global Metal Flows to the International Resource Panel 3. http://www.resourcepanel.org/file/364/download?token=hYEpbJx2 (12.09.2017).

Vorabfassung - wird durch die endgültige Fassung ersetzt.

Vogt, M., Fels, K. (2017): Bedarfsorientierte Ladeinfrastruktur aus Kundensicht. Handlungsempfehlungen für den flächendeckenden Aufbau benutzerfreundlicher Ladeinfrastruktur. Berlin: Schaufenster Elektromobilität. Ergebnispapier der Begleit- und Wirkungsforschung 35. http://schaufenster-elektromobilitaet.org/media/media/documents/dokumente_der_begleit__und_wirkungsforschung/EP35_Studie_LIS_online.pdf (18.07.2017).

Vogt, M., Malanowski, N., Glitz, R., Stahl-Rolf, S. (2015): Bestandsaufnahme Leichtbau in Deutschland. Kurzstudie. VDI Zentrum Ressourceneffizienz. https://www.bmwi.de/Redaktion/DE/Publikationen/Studien/bestandsaufnahme-leichtbau-in-deutschland.pdf?__blob=publicationFile&v=5 (10.07.2017).

Volkswagen AG (2017): The Volkswagen Group launches the most comprehensive electrification initiative in the automotive industry with „Roadmap E". Wolfsburg: Volkswagen AG. https://www.volkswagenag.com/en/news/2017/09/Roadmap_E.html (10.10.2017).

Wadud, Z., MacKenzie, D., Leiby, P. (2016): Help or hindrance? The travel, energy and carbon impacts of highly automated vehicles. Transportation Research, Part A: Policy and Practice 86, S. 1–18.

Wambach, K. (2011): Silicon based PV modules – recycling technology status. Vortrag, 2nd International Conference on PV Module Recycling, 25.01.2011, Madrid.

Wambach, K. (2009): PVCycle – The voluntary take back system and industrial recycling of PV modules. 24th European Photovoltaic Solar Energy Conference, 21.–25.09.2009, Hamburg.

Wambach, K., Rommel, W., Kerner, S. (2017): Optimierung des ökologischen Fußabdrucks neuer Werkstoffe in einer Kreislaufwirtschaft. Herausforderungen und Lösungen für kabonfaserverstärkte Kunststoffe und Solarmodule. In: Thomé-Kozmiensky, K. J., Goldmann, D. (Hrsg.): Recycling und Rohstoffe. Bd. 10. Neuruppin: TK Verlag Karl J. Thomé-Kozmiensky, S. 261–282.

Weckend, S., Wade, A., Heth, G. (2016): End-of-Life Management. Solar Photovoltaic Panels. Abu Dhabi, Paris: International Renewable Energy Agency, International Energy Agency. http://www.irena.org/DocumentDownloads/Publications/IRENA_IEAPVPS_End-of-Life_Solar_PV_Panels_2016.pdf (14.09.2017).

Weiß, C., Chlond, B., Behren, S. von, Hilgert, T., Vortisch, P. (2016): Deutsches Mobilitätspanel (MOP) – Wissenschaftliche Begleitung und Auswertungen. Bericht 2015/2016: Alltagsmobilität und Fahrleistung. Karlsruhe: Karlsruher Institut für Technologie, Institut für Verkehrswesen.

Weizsäcker, E. U. von, Hargroves, K., Smith, M. (2010): Faktor Fünf: Die Formel für nachhaltiges Wachstum. München: Droemer.

Wellmer, F.-W., Dalheimer, M. (2012): The feedback control cycle as regulator of past and future mineral supply. Mineralium Deposita 47 (7), S. 713–729.

Wells, P., Nieuwenhuis, P. (2012): Transition failure: Understanding continuity in the automotive industry. Technological Forecasting and Social Change 79 (9), S. 1681–1692.

Die Welt (14.03.2016): Sind Mega-Frachter ein Auslaufmodell? https://www.welt.de/regionales/hamburg/article153264707/Sind-Mega-Frachter-ein-Auslaufmodell.html (07.09.2017).

Werner, M. (2017): Einsatz von Rotorblätter aus Stahl in Windkraftanlagen. 07.09.2017.

Weyhe, R., Friedrich, B. (2016): Demonstrationsanlage für ein kostenneutrales, ressourceneffizientes Processing ausgedienter Li-Ion Batterien der Elektromobilität – EcoBatRec – Abschlussbericht. Mühlheim, Aachen: Accurec Recycling GmbH, IME Metallurgische Prozesstechnik und Metallrecycling RWTH Aachen. http://www.erneuerbar-mobil.de/sites/default/files/2017-01/EcoBatRec_16EM1002.pdf (08.09.2017).

WHO (World Health Organization) (2009): Night Noise Guideline for Europe. Copenhagen: WHO, Regional Office for Europe.

WHO (2006): WHO Air quality guidelines for particulate matter, ozone, nitrogen dioxide and sulfur dioxide. Global update 2005. Summary of risk assessment. Geneva: WHO.

Widmer, R., Du, X., Haag, O., Restrepo, E., Wäger, P. A. (2015): Scarce Metals in Conventional Passenger Vehicles and End-of-Life Vehicle Shredder Output. Environmental Science & Technology 49 (7), S. 4591–4599.

Vorabfassung - wird durch die endgültige Fassung ersetzt.

Wietschel, M. (2017): Daten und Fakten zum Energieverbrauch des Schienenverkehrs. Stand des Wissens: 04.02.2017. Karlsruhe: Fraunhofer-Institut für System- und Innovationsforschung ISI. https://www.forschungsinformationssystem.de/servlet/is/342234/ (17.07.2017).

Wietschel, M., Gnann, T., Kühn, A., Plötz, P., Moll, C., Speth, D., Buch, J., Boßmann, T., Stütz, S., Schellert, M., Rüdiger, D., Balz, W., Frik, H., Waßmuth, V., Paufler-Mann, D., Rödl, A., Schade, W., Mader, S. (2017a): Machbarkeitsstudie zur Ermittlung der Potentiale des Hybrid-Oberleitungs-Lkw. Studie im Rahmen der Wissenschaftlichen Beratung des BMVI zur Mobilitäts- und Kraftstoffstrategie. Karlsruhe, Berlin: Fraunhofer ISI, Fraunhofer IML, PTV Transport Consult, TU Hamburg-Harburg – IUE, M-Five. http://www.bmvi.de/SharedDocs/DE/Anlage/MKS/studie-potentiale-hybrid-oberleitungs-lkw.pdf?__blob=publicationFile (02.08.2017).

Wietschel, M., Thielmann, A., Plötz, P., Gnann, T., Sievers, L., Breitschopf, B., Doll, C., Moll, C. (2017b): Perspektiven des Wirtschaftsstandorts Deutschland in Zeiten zunehmender Elektromobilität. Karlsruhe: Fraunhofer-Institut für System- und Innovationsforschung ISI. Working Paper Sustainability and Innovation S 09/2017.

Winkler, C., Kröger, L., Nordenholz, F., Lobig, A. (2016): Verkehrsverlagerungspotenzial auf den Schienenverkehr in Deutschland unter Beachtung infrastruktureller Restriktionen. Endbericht im Rahmen der Wissenschaftlichen Begleitung, Unterstützung und Beratung des BMVI in den Bereichen Verkehr und Mobilität mit besonderem Fokus auf Kraftstoffen und Antriebstechnologien sowie Energie und Klima. Berlin, Heidelberg, München/Ottobrunn, Leipzig: Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt, IFEU – Institut für Energie- und Umweltforschung, Ludwig-Bölkow-Systemtechnik, Deutsches Biomasseforschungszentrum.

Wirtschaftsministerium Baden-Württemberg, Fraunhofer IAO (Fraunhofer-Institut für Arbeitswirtschaft und Organisation), WRS (Wirtschaftsförderung Region Stuttgart) (2010): Strukturstudie BWe mobil. Baden-Württemberg auf dem Weg in die Elektromobilität. Stuttgart: Wirtschaftsministerium Baden-Württemberg, Fraunhofer IAO, WRS. https://www.iao.fraunhofer.de/lang-de/images/studien/strukturstudie-bwe-mobil.pdf (07.07.2017).

Wissenschaftlicher Beirat beim BMVBS (Wissenschaftlicher Beirat beim Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung) (2009): Strategieplanung „Mobilität und Transport“ – Folgerungen für die Bundesverkehrswegeplanung. Stellungnahme des Wissenschaftlichen Beirats beim Bundesminister für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung vom Juli 2009. Berlin: Wissenschftalicher Beirat beim BMVBS.

Woidasky, J. (2013): Weiterentwicklung des Recyclings von faserverstärkten Verbunden. In: Thomé-Kozmiensky, K. J., Goldmann, D. (Hrsg.): Recycling und Rohstoffe. Bd. 6. Neuruppin: TK Verlag Karl J. Thomé-Kozmiensky, S. 241–260.

Wolf, T., Niemann, J. (2017): Verkehrs- und Energiewende verbinden: Potenziale und Herausforderungen der Sektorenkopplung. Vortrag, Wege zur Mobilitätswende. Forschung und Innovation für eine nachhaltige urbane Mobilität. Agendakonferenz, 22.06.2017, Berlin.

Wolff, F., Jacob, K., Guske, A.-L., Heyen, D. A., Hüsing, T. (2016): Kohärenzprüfung umweltpolitischer Ziele und Instrumente. Endbericht für das UFOPLAN-Vorhaben „Kohärenzprüfung umweltpolitischer Ziele und Maßnahmen für Zwecke der Umweltberichterstattung“. Dessau-Roßlau: Umweltbundesamt. Texte 76/2016.

Wolfram, P., Lutsey, N. (2016): Electric vehicles: Literature review of technology costs and carbon emissions. Washington, DC: International Council on Clean Transportation. Working Paper 2016-14. http://www.theicct.org/sites/default/files/publications/ICCT_LitRvw_EV-tech-costs_201607.pdf (14.09.2017).

World Bank (2017): The Growing Role of Minerals and Metals for a Low Carbon Future. Washington, DC: World Bank. http://documents.worldbank.org/curated/en/207371500386458722/pdf/117581-WP-P159838-PUBLIC-ClimateSmartMiningJuly.pdf (10.08.2017).

World Bank (2013): Turn the Heat Down. Climate Extremes, Regional Impacts, and the Case for Resilience. A report for the World Bank by the Potsdam Institute for Climate Impact Research and Climate Analytics. Washington, DC: The World Bank.

World Bank (2012): Turn down the heat: why a 4 C warmer world must be avoided. Washington, DC: World Bank. http://documents.worldbank.org/curated/en/865571468149107611/pdf/NonAsciiFileName0.pdf (27.09.2017).

Vorabfassung - wird durch die endgültige Fassung ersetzt.

WPCI (World Ports Climate Initiative) (o. J.): Environmental Ship Index ESI. o. O.: WPCI. http://www.environmentalshipindex.org (18.05.2017).

WU Wien (Wirtschaftsuniversität Wien) (2016): MFA ppt slides. Material flows slides 1980 – 2013. Rohstoffabbau weltweit 1970–2015. Unveröffentlicht, Website in Überarbeitung. Wien: WU Wien. http://www.materialflows.net/materialflowsnet/trends/download-slides/ (04.10.2017).

Wuppertal Institut für Klima, Umwelt, Energie, IFEU (Institut für Energie- und Umweltforschung), Öko-Institut, Fraunhofer ISI (Fraunhofer-Institut für System- und Innovationsforschung), Institut für Ressourceneffizienz und Energiestrategien, IFOK (Institut für Organisationskommunikation) (2016): Maßnahmenkatalog. Ergebnis des Dialogprozesses zum Klimaschutzplan 2050 der Bundesregierung. Berlin: Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit. http://www.klimaschutzplan2050.de/wp-content/uploads/2015/09/Massnahmenkatalog-3-1-final-Ergaenzungen-Anpassungen1.pdf (27.09.2016).

Wurster, R., Weindorf, W., Zittel, W., Schmidt, P., Heidt, C., Lambrecht, U., Lischke, A., Müller, S. (2014): LNG als Alternativkraftstoff für den Antrieb von Schiffen und schweren Nutzfahrzeugen. Kurzstudie im Rahmen des Auftrags Wissenschaftliche Begleitung, Unterstützung und Beratung des BMVBS in den Bereichen Verkehr und Mobilität mit besonderem Fokus auf Kraftstoffe und Antriebstechnologien sowie Energie und Klima des Bundesministeriums für Verkehr und digitale Infrastruktur (BMVI). Berlin, Heidelberg, München/Ottbrunn, Leipzig: DLR, IFEU – Institut für Energie- und Umweltforschung, Ludwig-Bölkow-Systemtechnik, DBFZ.

Xu, Z., Hu, W., Su, H., Turner, L. R., Ye, X., Wang, J., Tong, S. (2014a): Extreme temperatures and paediatric emergency department admissions. Journal of Epidemiology and Community Health 68, S. 304–311.

Xu, Z., Sheffield, P. E., Su, H., Wang, X., Bi, Y., Ton, S. (2014b): The impact of heat waves on children's health: a systematic review. International Journal of Biometeorology 58 (2), S. 239–247.

Yang, Z., Bandivadekar, A. (2017): Light-duty vehicle greenhouse gas and fuel economy standards. 2017 Global Update. Washington, DC: International Council on Clean Transportation.

Zeddies, J., Bahrs, E., Schönleber, N., Gamer, W. (2012): Globale Analyse und Abschätzung des Biomasse-Flächennutzungspotentials. Hohenheim: Universität Hohenheim – Institut für Landwirtschaftliche Betriebslehre.

Zepf, V., Simmons, J., Reller, A., Ashfield, M., Rennie, C. (2014): Materials critical to the energy industry. An introduction. 2nd ed. London: British Petrol.

Zimmer, W., Hacker, F., Rausch, L., Fritsche, U., Cyganski, R., Justen, A., Knitschky, G., Lischke, A., Mehlin, M., Müller, S., Schade, W., Hartwig, J., Sievers, L. (2013): Renewbility II. Weiterentwicklung des Analyseinstruments Renewbility. Renewbility II – Szenario für einen anspruchsvollen Klimaschutzbeitrag des Verkehrs. Dessau-Roßlau: Umweltbundesamt. UBA-Texte 84/2013.

Zukunft, D. (2002): Emissionsdifferenzierte Entgeltregelungen im Luftverkehr. Köln: Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt.

Zumkeller, D., Chlond, B., Kuhnimhof, T., Ottmann, P. (2004): Panelauswertung 2004. Datenaufbereitung, Plausibilisierung, erste Auswertungen zu den Erhebungen zur Alltagsmobilität 2004/06 sowie zu den Fahrleistungen und Treibstoffverbräuchen 2005/07 für das Mobilitätspanel. Zwischenbericht. Karlsruhe: Karlsruher Institut für Technologie, Institut für Verkehrswesen.

Vorabfassung - wird durch die endgültige Fassung ersetzt.

Abkürzungsverzeichnis

AbLaV	=	Verordnung zu abschaltbaren Lasten
ADP	=	Abiotic Depletion Potential
a-Si-Module	=	Module aus amorphem Silizium
AVAS	=	Acoustic Vehicle Altering System
BBSR	=	Bundesinstitut für Bau- Stadt- und Raumforschung
BGR	=	Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe
BIP	=	Bruttoinlandsprodukt
BMVI	=	Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur
BMZ	=	Bundesministerium für wirtschaftliche Zusammenarbeit und Entwicklung
BRKG	=	Bundesreisekostengesetz
BRZ	=	Bruttoraumzahl
BUND	=	Bund für Umwelt und Naturschutz Deutschland e. V.
BVerfGE	=	Entscheidungen des Bundesverfassungsgerichts
BVWP	=	Bundesverkehrswegeplan
CCTS	=	Carbon Capture, Transport and Storage
CdTe-Module	=	Cadmium-Tellurid-Module
CFK	=	kohlenstofffaserverstärkte Kunststoffe
CH_4	=	Methan
CIGS-Module	=	Kupfer-Indium-Gallium-Disulfid-/Diselenid-Module
CIGSS-Module	=	Kupfer-Indium-Gallium-Schwefel-Selenid-Module
CIS-Module	=	Kupfer-Indium-Disulfid-/Diselenid-Module
CO_2	=	Kohlenstoffdioxid
CO_{2eq}	=	CO_2-Äquivalent
COP 15	=	Fifteenth session of the Conference of the Parties
COPD	=	chronic obstructive pulmonary disease – chronisch obstruktive Lungenerkrankung
CORSIA	=	Carbon Offsetting Scheme for International Aviation
c-Si-Module	=	Module aus kristallinem Silizium
dB(A)	=	Dezibel (korrigiert nach Bewertungskurve A)
ECA	=	Emission Control Area – Emissionsüberwachungsgebiet
EE	=	erneuerbare Energien
EEA	=	European Environment Agency

Vorabfassung - wird durch die endgültige Fassung ersetzt.

EEDI	=	Energy Efficiency Design Index
EEG	=	Erneuerbare-Energien-Gesetz
EEG-Umlage	=	Umlage nach dem Erneuerbare-Energien-Gesetz
EITI	=	Extractive Industries Transparency Initiative
EIV	=	Estimated Index Value
EnergieStG	=	Energiesteuergesetz
ESI	=	Environmental Ship Index
EU	=	Europäische Union
EU ETS	=	European Union Emissions Trading System – Europäisches Emissionshandelssystem
EVA	=	Ethylenvinylacetat
EWF	=	Emission Weighting Factor
FÖS	=	Forum ökologisch-soziale Marktwirtschaft
Fz-km	=	Fahrzeugkilometer
GaAs-Module	=	Gallium-Arsenid-Module
GFK	=	glasfaserverstärkte Kunststoffe
GJ	=	Gigajoule
GPS	=	Global Positioning System
GW	=	Gigawatt
H_2	=	Wasserstoff
Hg	=	Quecksilber
HGÜ	=	Hochspannungs-Gleichstrom-Übertragung
HSLA	=	High-strength low-alloy
ICAO	=	International Civil Aviation Organization – Internationale Zivilluftfahrtorganisation
ICMM	=	International Council on Mining and Metals
IDIS	=	International Dismantling Information System
IKT	=	Informations- und Kommunikationstechnologien
ILO	=	International Labour Organization
IMDS	=	International Material Data System
IMO	=	International Maritime Organization
IPCC	=	Intergovernmental Panel on Climate Change
ITO	=	indium tin oxide – Indiumzinnoxid
IUP	=	Integriertes Umweltprogramm
J	=	Joule

Vorabfassung - wird durch die endgültige Fassung ersetzt.

KBA	=	Kraftfahrt-Bundesamt
KV	=	kombinierter Verkehr
kWh	=	Kilowattstunde(n)
KWK	=	Kraft-Wärme-Kopplung
KWKG	=	Kraft-Wärme-Kopplungsgesetz
Li-Ionen-Akkumulatoren	=	Lithium-Ionen-Akkumulatoren
lit.	=	Buchstabe
LNG	=	liquefied natural gas – Flüssiggas
MEPC	=	Marine Environment Protection Committee
MIV	=	motorisierter Individualverkehr
MJ	=	Megajoule
MKS	=	Mobilitäts- und Kraftstoffstrategie der Bundesregierung
MRV	=	Monitoring, Reporting and Verification
MW	=	Megawatt
N_2O	=	Lachgas
NdFeB-Magnete	=	Neodym-Eisen-Bor-Magnete
NECA	=	Nitrous Oxide Emission Control Area – Stickstoffemissionsüberwachungsgebiet
NEFZ	=	Neuer Europäischer Fahrzyklus
NH_3	=	Ammoniak
NHTSA	=	National Highway Transportation Safety Agency
NKV	=	Nutzen-Kosten-Verhältnis
NMVOC	=	non methane volatile organic compounds – flüchtige organische Verbindungen ohne Methan
NO_x	=	Stickstoffoxide
OBU	=	On-Board-Unit
OECD	=	Organisation for Economic Co-operation and Development – Organisation für wirtschaftliche Zusammenarbeit und Entwicklung
OLG	=	Oberlandesgericht
ÖPNV	=	öffentlicher Personennahverkehr
ÖSPV	=	öffentlicher Straßenpersonenverkehr
ÖV	=	öffentlicher Verkehr
PBefG	=	Personenbeförderungsgesetz
PJ	=	Petajoule
Pkm	=	Personenkilometer
PM	=	Particulate Matter – Partikel mit einem Durchmesser von z. B. 2,5 µm ($PM_{2,5}$), 10 µm (PM_{10})

Vorabfassung - wird durch die endgültige Fassung ersetzt.

PtG	=	Power-to-Gas
PtL	=	Power-to-Liquid
PtX	=	Power-to-X
PVC	=	Polyvinylchlorid
PVF	=	Polyvinylfluorid
RDE	=	Real Driving Emissions
RFI	=	Radiative Forcing Index
SDG	=	Sustainable Development Goals – Ziele für nachhaltige Entwicklung
SECA	=	Sulphur Emission Control Area –Schwefelemissionsüberwachungsgebiet
SEEMP	=	Ship Energy Efficiency Management Plan
SO_2	=	Schwefeldioxid
SO_x	=	Schwefeloxide
SPFV	=	Schienenpersonenfernverkehr
SPNV	=	Schienenpersonennahverkehr
SRU	=	Sachverständigenrat für Umweltfragen
StromNEV	=	Stromnetzentgeltverordnung
SUP	=	Strategische Umweltprüfung
SUV	=	Sport Utility Vehicle
TEU	=	Twenty-foot Equivalent Unit
tkm	=	Tonnenkilometer
TWh	=	Terawattstunde(n)
UBA	=	Umweltbundesamt
USD	=	US-Dollar
V2I	=	Vehicle-to-infrastructure
V2V	=	Vehicle-to-vehicle
VECTO	=	Vehicle Energy Consumption Calculation Tool
WHO	=	World Health Organization – Weltgesundheitsorganisation
WLTP	=	Worldwide Harmonized Light-Duty Vehicles Test Procedure
WPCI	=	World Ports Climate Initiative
zGG	=	zulässiges Gesamtgewicht

Vorabfassung - wird durch die endgültige Fassung ersetzt.

Rechtsquellenverzeichnis

Abkommen über die internationale Zivilluftfahrt (Chicagoer Abkommen)	Abkommen über die internationale Zivilluftfahrt (Chicagoer Abkommen)
Altfahrzeug-Richtlinie	Richtlinie 2000/53/EG des Europäischen Parlaments und des Rates vom 18. September 2000 über Altfahrzeuge
Altfahrzeug-Verordnung	Verordnung über die Überlassung, Rücknahme und umweltverträgliche Entsorgung von Altfahrzeugen
Batteriegesetz – BattG	Gesetz über das Inverkehrbringen, die Rücknahme und die umweltverträgliche Entsorgung von Batterien und Akkumulatoren
Batterie-Richtlinie	Richtlinie 2006/66/EG des Europäischen Parlaments und des Rates vom 6. September 2006 über Batterien und Akkumulatoren sowie Altbatterien und Altakkumulatoren und zur Aufhebung der Richtlinie 91/157/EWG
Berufszugangsverordnung für den Straßenpersonenverkehr – PBzugV	Berufszugangsverordnung für den Straßenpersonenverkehr
Bundesreisekostengesetz – BRKG	Bundesreisekostengesetz
Energiesteuergesetz – EnergieStG	Energiesteuergesetz
Energiesteuerrichtlinie	Richtlinie 2003/96/EG des Rates vom 27. Oktober 2003 zur Restrukturierung der gemeinschaftlichen Rahmenvorschriften zur Besteuerung von Energieerzeugnissen und elektrischem Strom
Erneuerbare-Energien-Gesetz – EEG	Gesetz für den Vorrang Erneuerbarer Energien
Flaggenrechtsgesetz	Gesetz über das Flaggenrecht der Seeschiffe und die Flaggenführung der Binnenschiffe
Kreislaufwirtschaftsgesetz – KrWG	Gesetz zur Förderung der Kreislaufwirtschaft und Sicherung der umweltverträglichen Bewirtschaftung von Abfällen
Kraft-Wärme-Kopplungsgesetz – KWKG	Gesetz für die Erhaltung, die Modernisierung und den Ausbau der Kraft-Wärme-Kopplung
Ladesäulenverordnung – LSV	Verordnung über technische Mindestanforderungen an den sicheren und interoperablen Aufbau und Betrieb von öffentlich zugänglichen Ladepunkten für Elektromobile
Luftqualitätsrichtlinie	Richtlinie 2008/50/EG des Europäischen Parlaments und des Rates vom 21. Mai 2008 über Luftqualität und saubere Luft für Europa
Mehrwertsteuerrichtlinie	Richtlinie 2006/112/EG des Rates vom 28. November 2006 über das gemeinsame Mehrwertsteuersystem

Vorabfassung - wird durch die endgültige Fassung ersetzt.

Personenbeförderungsgesetz – PBefG	Personenbeförderungsgesetz
Richtlinie über den Aufbau der Infrastruktur für alternative Kraftstoffe	Richtlinie 2014/94/EU des Europäischen Parlaments und des Rates vom 22. Oktober 2014 über den Aufbau der Infrastruktur für alternative Kraftstoffe
Seearbeitsübereinkommen	Seearbeitsübereinkommen
Straßenbahn-Bau- und Betriebsordnung – BOStrab	Verordnung über den Bau und Betrieb der Straßenbahnen
Stromnetzentgeltverordnung – StromNEV	Verordnung über die Entgelte für den Zugang zu Elektrizitätsversorgungsnetzen
SUP-Richtlinie	Richtlinie 2001/42/EG des Europäischen Parlaments und des Rates vom 27. Juni 2001 über die Prüfung der Umweltauswirkungen bestimmter Pläne und Programme
Typengenehmigungs-Richtlinie	Richtlinie 2005/64/EG des Europäischen Parlaments und des Rates vom 26. Oktober 2005 über die Typgenehmigung für Kraftfahrzeuge hinsichtlich ihrer Wiederverwendbarkeit, Recyclingfähigkeit und Verwertbarkeit und zur Änderung der Richtlinie 70/156/EWG des Rates
Verordnung (EU) 2017/821 zur Erfüllung der Sorgfaltspflichten in der Lieferkette	Verordnung (EU) 2017/821 des Europäischen Parlaments und des Rates vom 17. Mai 2017 zur Festlegung von Pflichten zur Erfüllung der Sorgfaltspflichten in der Lieferkette für Unionseinführer von Zinn, Tantal, Wolfram, deren Erzen und Gold aus Konflikt- und Hochrisikogebieten
Verordnung (EU) Nr. 525/2013 über ein System für die Überwachung von Treibhausgasemissionen	Verordnung (EU) Nr. 525/2013 des Europäischen Parlaments und des Rates vom 21. Mai 2013 über ein System für die Überwachung von Treibhausgasemissionen sowie für die Berichterstattung über diese Emissionen und über andere klimaschutzrelevante Informationen auf Ebene der Mitgliedstaaten und der Union und zur Aufhebung der Entscheidung Nr. 280/2004/EG
Verordnung (EU) Nr. 2015/757 über die Überwachung von Kohlendioxidemissionen aus dem Seeverkehr	Verordnung (EU) Nr. 2015/757 über die Überwachung von Kohlendioxidemissionen aus dem Seeverkehr, die Berichterstattung darüber und die Prüfung dieser Emissionen und zur Änderung der Richtlinie 2009/16/EG
Verordnung über den Betrieb von Kraftfahrunternehmen im Personenverkehr – BOKraft	Verordnung über den Betrieb von Kraftfahrunternehmen im Personenverkehr
Verordnung zu abschaltbaren Lasten – AbLaV	Verordnung über Vereinbarungen zu abschaltbaren Lasten
Wegekosten-Richtlinie	Richtlinie 1999/62/EG des Europäischen Parlaments und des Rates vom 17. Juni 1999 über die Erhebung von Gebühren für die Benutzung bestimmter Verkehrswege durch schwere Nutzfahrzeuge

Vorabfassung - wird durch die endgültige Fassung ersetzt.

Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit

Erlass über die Einrichtung eines Sachverständigenrates für Umweltfragen bei dem Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit.
Vom 1. März 2005

§ 1

Zur periodischen Begutachtung der Umweltsituation und Umweltbedingungen der Bundesrepublik Deutschland und zur Erleichterung der Urteilsbildung bei allen umweltpolitisch verantwortlichen Instanzen sowie in der Öffentlichkeit wird ein Sachverständigenrat für Umweltfragen gebildet.

§ 2

(1) Der Sachverständigenrat für Umweltfragen besteht aus sieben Mitgliedern, die über besondere wissenschaftliche Kenntnisse und Erfahrungen im Umweltschutz verfügen müssen.

(2) Die Mitglieder des Sachverständigenrates für Umweltfragen dürfen weder der Regierung oder einer gesetzgebenden Körperschaft des Bundes oder eines Landes noch dem öffentlichen Dienst des Bundes, eines Landes oder einer sonstigen juristischen Person des öffentlichen Rechts, es sei denn als Hochschullehrer oder -lehrerin oder als Mitarbeiter oder Mitarbeiterin eines wissenschaftlichen Instituts, angehören. Sie dürfen ferner nicht Repräsentant oder Repräsentantin eines Wirtschaftsverbandes oder einer Arbeitgeber- oder Arbeitnehmerorganisation sein oder zu diesen in einem ständigen Dienst- oder Geschäftsbesorgungsverhältnis stehen; sie dürfen auch nicht während des letzten Jahres vor der Berufung zum Mitglied des Sachverständigenrates für Umweltfragen eine derartige Stellung innegehabt haben.

§ 3

Der Sachverständigenrat für Umweltfragen soll die jeweilige Situation der Umwelt und deren Entwicklungstendenzen darstellen. Er soll Fehlentwicklungen und Möglichkeiten zu deren Vermeidung oder zu deren Beseitigung aufzeigen.

§ 4

Der Sachverständigenrat für Umweltfragen ist nur an den durch diesen Erlass begründeten Auftrag gebunden und in seiner Tätigkeit unabhängig.

§ 5

Der Sachverständigenrat für Umweltfragen gibt während der Abfassung seiner Gutachten den jeweils fachlich betroffenen Bundesministerien oder ihren Beauftragten Gelegenheit, zu wesentlichen sich aus seinem Auftrag ergebenden Fragen Stellung zu nehmen.

§ 6

Der Sachverständigenrat für Umweltfragen kann zu einzelnen Beratungsthemen Behörden des Bundes und der Länder hören sowie Sachverständigen, insbesondere Vertretern und Vertreterinnen von Organisationen der Wirtschaft und der Umweltverbände, Gelegenheit zur Äußerung geben.

§ 7

(1) Der Sachverständigenrat für Umweltfragen erstattet alle vier Jahre ein Gutachten und leitet es der Bundesregierung jeweils im Monat Mai zu. Das Gutachten wird vom Sachverständigenrat für Umweltfragen veröffentlicht.

(2) Der Sachverständigenrat für Umweltfragen erstattet zu Einzelfragen zusätzliche Gutachten oder gibt Stellungnahmen ab. Das Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit kann den Sachverständigenrat für Umweltfragen mit der Erstattung weiterer Gutachten oder Stellungnahmen beauftragen. Der Sachverständigenrat für Umweltfragen leitet Gutachten oder Stellungnahmen nach Satz 1 und 2 dem Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit zu.

Vorabfassung - wird durch die endgültige Fassung ersetzt.

§ 8

(1) Die Mitglieder des Sachverständigenrates für Umweltfragen werden vom Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit nach Zustimmung des Bundeskabinetts für die Dauer von vier Jahren berufen. Dabei wird auf die gleichberechtigte Teilhabe von Frauen und Männern nach Maßgabe des Bundesgremienbesetzungsgesetzes hingewirkt. Wiederberufung ist möglich.

(2) Die Mitglieder können jederzeit schriftlich dem Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit gegenüber ihr Ausscheiden aus dem Rat erklären.

(3) Scheidet ein Mitglied vorzeitig aus, so wird ein neues Mitglied für die Dauer der Amtszeit des ausgeschiedenen Mitglieds berufen; Wiederberufung ist möglich.

§ 9

(1) Der Sachverständigenrat für Umweltfragen wählt in geheimer Wahl aus seiner Mitte einen Vorsitzenden oder eine Vorsitzende für die Dauer von vier Jahren. Wiederwahl ist möglich.

(2) Der Sachverständigenrat für Umweltfragen gibt sich eine Geschäftsordnung. Sie bedarf der Genehmigung des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit.

(3) Vertritt eine Minderheit bei der Abfassung der Gutachten zu einzelnen Fragen eine abweichende Auffassung, so hat sie die Möglichkeit, diese in den Gutachten zum Ausdruck zu bringen.

§ 10

Der Sachverständigenrat für Umweltfragen wird bei der Durchführung seiner Arbeit von einer Geschäftsstelle unterstützt.

§ 11

Die Mitglieder des Sachverständigenrates für Umweltfragen und die Angehörigen der Geschäftsstelle sind zur Verschwiegenheit über die Beratungen und die vom Sachverständigenrat als vertraulich bezeichneten Beratungsunterlagen verpflichtet. Die Pflicht zur Verschwiegenheit bezieht sich auch auf Informationen, die dem Sachverständigenrat gegeben und als vertraulich bezeichnet werden.

§ 12

(1) Die Mitglieder des Sachverständigenrates für Umweltfragen erhalten eine pauschale Entschädigung sowie Ersatz ihrer Reisekosten. Diese werden vom Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit im Einvernehmen mit dem Bundesministerium des Innern und dem Bundesministerium der Finanzen festgesetzt.

(2) Die Kosten des Sachverständigenrates für Umweltfragen trägt der Bund.

§ 13

(1) Im Hinblick auf den in § 7 Abs. 1 neu geregelten Termin für die Zuleitung des Gutachtens an die Bundesregierung kann das Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit die bei Inkrafttreten dieses Erlasses laufenden Berufungsperioden der Mitglieder des Sachverständigenrates ohne Zustimmung des Bundeskabinetts bis zum 30.06.2008 verlängern.

§14

Der Erlass über die Einrichtung eines Rates von Sachverständigen für Umweltfragen bei dem Bundesminister für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit vom 10. August 1990 (GMBl. 1990, Nr. 32 , S. 831) wird hiermit aufgehoben.

Berlin, den 1. März 2005

G I 1 – 46010/2

Der Bundesminister für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit
Jürgen Trittin

Vorabfassung - wird durch die endgültige Fassung ersetzt.

Vorabfassung - wird durch die endgültige Fassung ersetzt.

Umsteuern erforderlich: Klimaschutz im Verkehrssektor

Der Verkehrssektor ist derzeit für etwa ein Fünftel der Treibhausgasemissionen Deutschlands verantwortlich. Während in anderen Sektoren seit 1990 zum Teil deutliche Emissionsminderungen erzielt wurden, sind die Emissionen des Verkehrs im gleichen Zeitraum sogar leicht angestiegen. In seinem Sondergutachten „Umsteuern erforderlich: Klimaschutz im Verkehrssektor“ zeigt der SRU auf, welche strategischen Weichen für die Verkehrswende gestellt werden sollten.

Die Dekarbonisierung des Verkehrssektors erfordert eine konsistente Gesamtkonzeption. Dabei sollte schnellstmöglich ein Umstieg auf alternative Antriebe erfolgen. Im Straßenverkehr ist die Elektromobilität zu forcieren, denn durch eine direkte Elektrifizierung wird der Primärenergieverbrauch möglichst gering gehalten. Gewinnung und Kreislaufführung der für die Elektromobilität erforderlichen Rohstoffe sollten zukunftsfähig gestaltet werden. Zudem muss auch der Energieverbrauch des motorisierten Verkehrs weiter deutlich gesenkt werden, vor allem durch fahrzeugseitige Effizienzmaßnahmen. Neben technologischen Veränderungen ist auch ein grundlegender Wandel der Verkehrssysteme und Mobilitätsmuster notwendig. Die Vermeidung und Verlagerung von Verkehren trägt nicht nur zum Klimaschutz, sondern auch zur Verringerung seiner sonstigen Umwelt- und Gesundheitsbelastungen bei. Um die Kostenwahrheit im Verkehrssektor zu fördern, sollten Steuern, Abgaben und Subventionen konsistent an klima-, umwelt- und gesundheitspolitischen Zielen ausgerichtet werden. Dazu zählt für den SRU auch die Einführung einer streckenabhängigen Pkw-Maut.

Vorabfassung - wird durch die endgültige Fassung ersetzt.